INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

EL OLFATO EN LA COVID-19 | EL SOÑADOR DE LA TEORÍA FINAL | ¿POR QUÉ JUEGAN LOS ANIMALES?

OCTUBRE 2021 N.º 541

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Octubre 2021 • N.º 541 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

EL OLFATO EN LA COVID-19

Varios trabajos empiezan a esclarecer por qué el coronavirus trastoca este sentido fundamental



ASTRONOMÍA
Enanas marrones: entre estrellas y planetas

ETOLOGÍA
¿Por qué juegan los animales?

NEUROCIENCIA
Una nueva manera de entender el alzhéimer

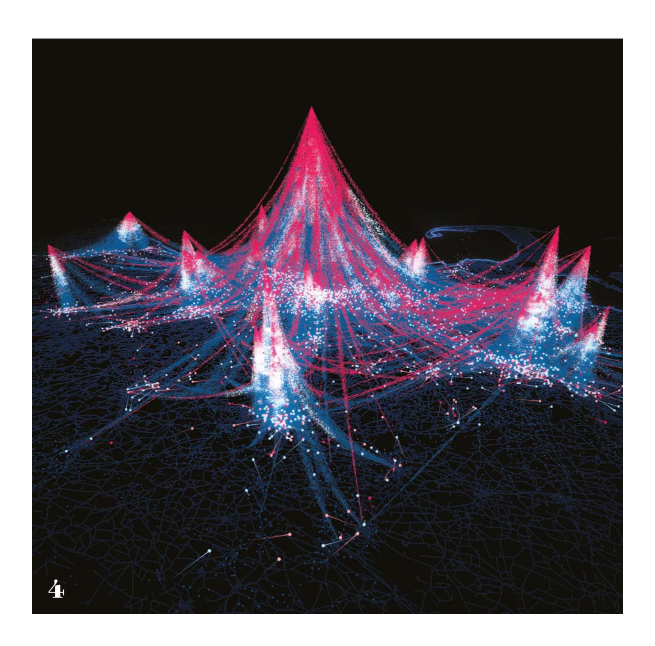


INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA
Octubre 2021, Número 541

32

ARTÍCULOS









INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA

SECCIONES



EN PORTADA



La pérdida del olfato y del gusto son frecuentes en varias enfermedades que afectan a las estructuras anatómicas y nerviosas de los sistema olfativo y gustativo. En la COVID-19, la alteración de estos sentidos se debe a la acción del virus SARS-CoV-2 sobre las mucosas olfativa y gustativa. Las nuevas investigaciones están esclareciendo los mecanismos neurobiológicos implicados en ese ataque y el modo en que se recuperan ambos sentidos. Ilustración: Getty Images/Danylana/iStock

redaccion@investigacionyciencia.es



Junio 2021

CADENAS DE MÁRKOV

En la sección de «Juegos Matemáticos» sobre las cadenas de Márkov [«Las leyes del azar y el libre albedrío», por Bartolo Luque; Investigación y Ciencia, junio de 2021], se dice que, al analizar las primeras 20.000 letras de la novela *Eugenio Oneguin*, de Alexánder Pushkin, Andréi Márkov encontró que el 43 por ciento eran vocales. Sin embargo, al calcular el vector de estados cuando el número de pasos tiende a infinito, el valor obtenido es (0,39; 0,61). Y según se dice en el artículo, «eso implica que, a la larga, cabe esperar que el 39 por ciento de las letras de la novela de Pushkin sean vocales, y el 61 por ciento, consonantes».

Esto último parece entrar en aparente contradicción con el 43 por ciento que encontró Márkov al analizar las primeras 20.000 letras. Creo que la matriz de transiciones para n = 20.000 es prácticamente la misma que para el límite infinito. ¿Quizás se trata de las probabilidades de sucesos diferentes?

Salvador González
Bilbao

Responde Luque: *Es cierto que 20.000 letras son muchas, pero la diferencia entre la proporción de vocales para ese fragmento y el estado estacionario para un texto infinito es solo de cuatro centésimas: 0,43 frente a 0,39, un error compatible con el tamaño de la muestra si suponemos normalidad. La información relevante de esas 20.000 letras es la matriz de transición, más que el porcentaje de vocales, como se explica en el texto: el porcentaje estacionario de vocales es independiente de su condición inicial.*

ECOLOGISMO Y ENERGÍA NUCLEAR

El artículo «La energía nuclear, diez años después de Fukushima» [por Aditi Verma, Ali Ahmad y Francesca Giovannini; Investigación y Ciencia, junio de 2021] trata del papel de la energía nuclear en la lucha contra el cambio climático. En él se destaca el rechazo de la opinión pública hacia esta tecnología, entendiendo que es consecuencia de los riesgos que se pusieron en evidencia con los accidentes de Chernóbil y Fukushima. También se comenta, entre otras cosas, el papel que han jugado en este ámbito empresas y Gobiernos.

Sorprende que el texto omita uno de los agentes que ha sido más decisivo en la creación de este rechazo social. Me refiero a las organizaciones y partidos del ámbito ecologista, los cuales no deben identificarse con la sociedad en sí, sino que, al igual que las empresas y los Gobiernos, tienen su entidad e intereses propios. Estos agentes han lanzado durante años continuas y agresivas campañas en contra de la energía nuclear.

Del propio texto se trasluce la utilidad de esta tecnología en la descarbonización de las fuentes de energía. Estoy convencido de que si se hubieran confrontado, con criterios puramente técnicos, los riesgos del cambio climático y de la energía nuclear, habrían sido los propios ecologistas sus mayores defensores. Sin embargo, para estas entidades el cambio climático es solo una parte dentro de un ambicioso paquete ideológico, lo que necesariamente ha debido pesar en sus líneas argumentales. Es un hecho que el veto a la energía nuclear en el contexto de la crisis climática genera una gran tensión en el entorno económico y social, lo que aporta al ecologismo mucho mayor relevancia, tanto en el escenario ideológico como en el político.

Probablemente, de no haber existido las referidas campañas antinucleares, la sociedad habría asumido con naturalidad el riesgo inherente a esta tecnología, de la misma forma que lo ha hecho con otras, como puede ser la biología molecular, susceptible también de dar lugar a accidentes con efectos letales y consecuencias a muy largo plazo.

Francisco López Gomáriz
L'Hospitalet, Barcelona



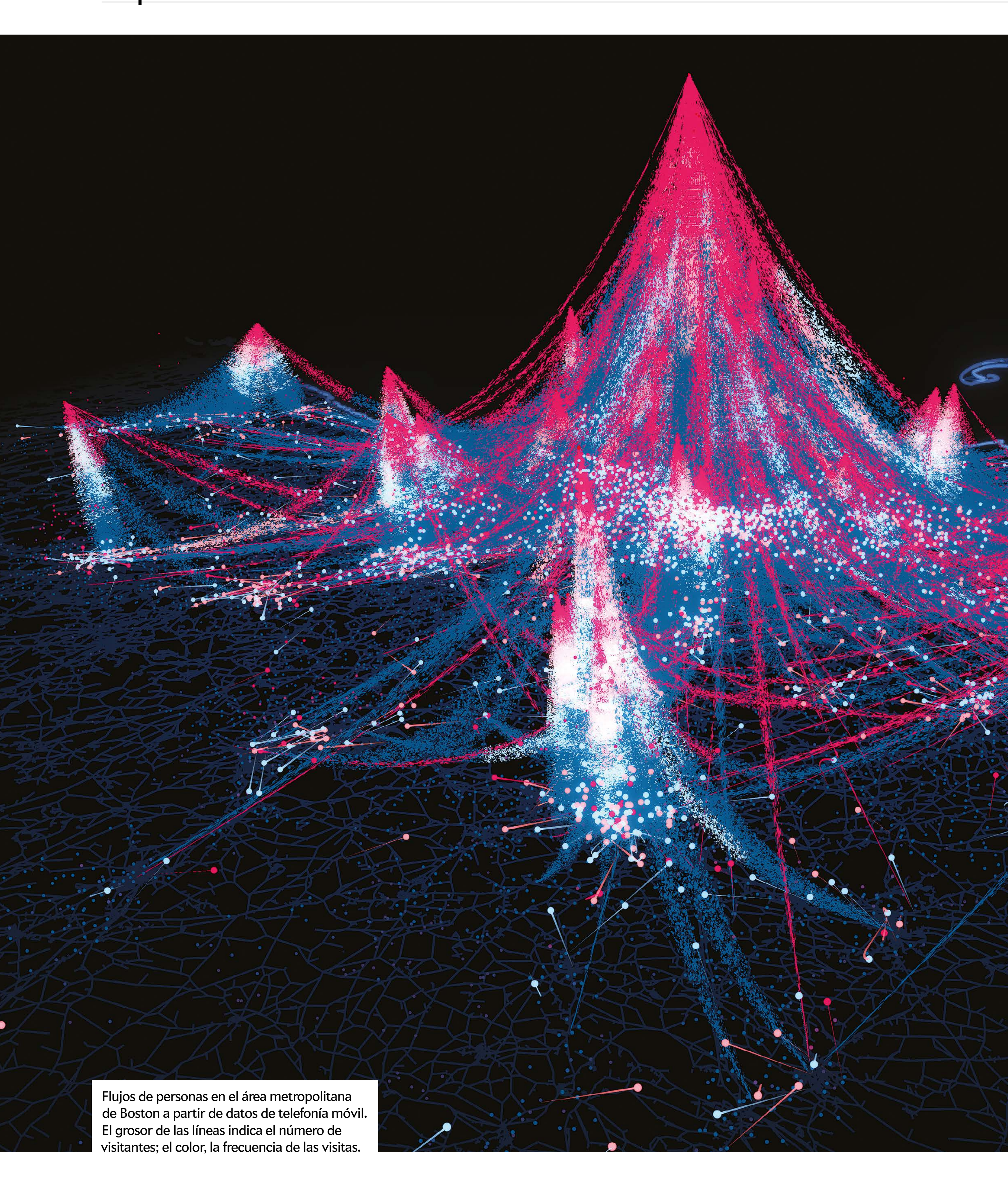
GETTY IMAGES/VLIET/ISTOCK

Manifestación antinuclear celebrada en Ámsterdam el 16 de abril de 2011, pocas semanas después del accidente de Fukushima.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Valencia 307, 3.º 2.ª, 08009 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



Flujos de personas en el área metropolitana de Boston a partir de datos de telefonía móvil. El grosor de las líneas indica el número de visitantes; el color, la frecuencia de las visitas.



LABORATORIO DE CIUDADES SENSIBLES DEL INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE MASSACHUSETTS

SISTEMAS COMPLEJOS

Las matemáticas del tránsito

Una fórmula sencilla predice cómo se mueven las personas en las ciudades de todo el mundo

Cabría pensar que las personas que se encuentran en el centro de una ciudad en un momento dado constituyen un conjunto aleatorio de individuos. Sin embargo, un nuevo estudio muestra que los patrones de desplazamiento urbano en todo el mundo son notablemente predecibles e independientes de la ubicación. El hallazgo podría ayudar a mejorar los modelos de propagación de enfermedades y a optimizar la planificación de las ciudades.

Los investigadores estudiaron datos anonimizados de telefonía móvil y hallaron una relación cuadrática inversa entre el número de personas que hay en una cierta área urbana y el producto de la distancia que han recorrido para llegar a ella por la frecuencia con la que realizan ese viaje. Puede parecer intuitivo que la gente visite a menudo los sitios cercanos y más raramente los alejados, pero la relación recién descubierta expresa esa idea de forma cuantitativa. Por ejemplo, predice con precisión que el número de personas que acuden a un lugar cinco veces por semana desde una distancia de dos kilómetros coincidirá con el número de quienes van allí dos veces por semana y recorren cinco kilómetros. Los investigadores publicaron en *Nature* su nueva ley de visitas y un versátil modelo basado en ella que describe los movimientos de las personas en las ciudades.

«Es un resultado muy impactante y sólido», valora Laura Alessandretti, socióloga computacional de la Universidad Técnica de Dinamarca que no tomó parte en el estudio pero que escribió un comentario sobre el trabajo. «Solemos pensar que hay muchos factores contextuales que afectan a nuestra forma de movernos, como la red de transporte, la morfología de un cierto lugar o los aspectos socioeconómicos. Eso es cierto hasta cierto punto, pero este hallazgo demuestra que hay algunas leyes robustas que son válidas en todas partes.»

Los investigadores analizaron los datos de unos ocho millones de personas, recopilados entre 2006 y 2013 en seis áreas urbanas: Boston, Singapur, Lisboa, Oporto, Dakar y Abiyán. Los análisis anteriores habían empleado los datos de telefonía móvil para estudiar las trayectorias de los individuos; en cambio, el nuevo trabajo se

centró en los lugares y examinó cuántas personas los visitaban, desde qué distancia y con cuánta frecuencia. El equipo descubrió que todas las decisiones particulares que toma la gente —desde dejar a los niños en el colegio hasta ir de compras o desplazarse al trabajo— obedecen a esta ley cuadrática inversa si las consideramos en conjunto. «El resultado es muy simple, pero bastante sorprendente», opina Geoffrey West, físico teórico del Instituto Santa Fe y uno de los autores principales del artículo.

Una explicación para este marcado patrón estadístico es que viajar requiere tiempo y energía, y la gente dispone de recursos limitados para hacerlo. «Entra en juego algo muy fundamental: vivamos en Senegal o en Boston, tratamos de optimizar nuestro día», afirma el primer autor del estudio, Markus Schläpfer, del Laboratorio de Ciudades Futuras, un centro mixto de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich y las Universidades de Singapur. «En el fondo se trata del esfuerzo conjunto que la gente está dispuesta a realizar para viajar a determinados lugares.» Comprender esos patrones no solo es importante para planificar el emplazamiento de nuevos centros comerciales o el transporte público, sino también para modelizar la transmisión de enfermedades en las ciudades, señala Kathleen Stewart, geógrafa e investigadora de la movilidad de la Universidad de Maryland que no participó en el estudio.

Otros investigadores han estudiado los desplazamientos con «modelos gravitatorios», que suponen que el movimiento entre ciudades es proporcional a sus poblaciones. Pero estos modelos no consideran los patrones de desplazamiento dentro de las ciudades, una información especialmente relevante al abordar la propagación de enfermedades. El epidemiólogo de la Universidad del Noreste Sam Scarpino, ajeno al estudio, afirma que los modelos basados en el nuevo resultado podrían reflejar mejor esos flujos. Por ejemplo, lo más probable es que los habitantes de Nueva York hagan viajes cortos y frecuentes dentro de su propio distrito, como Manhattan o el Bronx, y visiten menos los distritos lejanos.

«Esos patrones organizativos tienen implicaciones muy profundas en la forma en que se propaga la COVID», sostiene Scarpino. En una pequeña localidad rural donde mucha gente acude regularmente a la misma iglesia o tienda de alimentación, todo el pueblo experimentará picos agudos de infección a medida que el virus se extienda por la comunidad. Pero en una ciudad más grande, la propagación requiere más tiempo, explica el científico, porque pueden producirse pequeños brotes más o menos independientes en cada barrio.

Según Stewart, «los autores muestran que su ley de visitas, que tiene en cuenta tanto la distancia como la frecuencia del viaje de un modo que no observamos en otros modelos, supera a los modelos gravitatorios a la hora de predecir los flujos entre distintos lugares».

—Viviane Callier

PALEOARQUEOLOGÍA

Evolución de la alimentación canina

Las heces fosilizadas contienen pistas sobre los cambios que experimentó la digestión de los perros



La transición desde la caza y la recolección hasta la agricultura no solo alteró la evolución humana, sino la de nuestro compañero más fiel, el perro. Greger Larson, arqueólogo de la Universidad de Oxford, considera que las heces petrificadas, o coprolitos, son una fuente de información extraordinaria sobre el modo en que la alimentación condicionó el proceso. «Son instantáneas del intestino de cada individuo.» El reciente análisis de 13 coprolitos caninos de la Edad del Bronce ha revelado que la alimentación a base de cereales modificó el microbioma intestinal del perro, lo que pudo tener consecuencias en su domesticación.

Los autores secuenciaron el ADN de los fósiles, de entre 3600 y 3450 años de antigüedad, hallados en un yacimiento perteneciente a una antigua comunidad agrícola del noreste de Italia. En comparación con el de un perro actual, el ADN canino extraído de los coprolitos contenía menos copias del gen de la amilasa, una proteína digestiva que descompone el almidón en el intestino. Muchos lobos ni siquiera poseen una copia, por lo que los expertos atribuyen tal disparidad respecto al perro doméstico a la sustitución de la alimentación predominantemente carnívora por otra rica en cereales.

No obstante, además de las proteínas del propio animal, los microbios intestinales también intervienen en la digestión. Al secuenciar los restos de ADN microbiano hallados en las heces fósiles, los autores encontraron rastros de bacterias que sintetizan amilasas en gran cantidad. El genoma canino no había completado la adaptación a los cereales cultivados con que sus domesticadores humanos los alimentaban, «así que los microbios lo complementaron», explica el microbiólogo de la Universidad de Bolonia Marco Candela, autor principal del estudio, publicado en *iScience*.

Si bien los microbiomas fósiles arrojan luz sobre un estadio intermedio entre el lobo y el perro, la domesticación no fue un simple proceso lineal, matiza Angela Perri, zooarqueóloga de la Universidad de Durham, ajena al estudio. «Lo más fácil y sencillo es pensar que se trata de una progresión de X a Y y de Y a Z», afirma, pero la hibridación continua entre los cánidos salvajes y los domesticados complica las cosas. Las razas caninas actuales no comparten la misma dotación de genes de las amilasas, subraya Larson, quien tampoco ha formado parte del equipo de investigación. Con todo, Perri considera trascendente que los microbios suplieran las carencias del genoma del perro, fenómeno este que también podría haber ocurrido en el intestino humano durante la transición alimentaria que marcó el paso de la caza y la recolección a la agricultura, una posibilidad que Candela y sus colaboradores están estudiando en este momento.

Perri destaca que esta nueva investigación hace patente la cantidad de información que pueden albergar los excrementos animales fosilizados, un recurso tradicionalmente inexplotado y poco valorado de los antiguos asentamientos humanos. «En arqueología muchas veces no es fácil conseguir material humano, pero nadie se disputa la caca de perro», concluye.

—Tess Joosse

THOMAS FUCHS

BIOQUÍMICA

Detector de vida

Un sensor aéreo vigilaría la vida en la Tierra y tal vez en otros planetas

Las formas de vida terrestres se caracterizan por la preferencia hacia formas concretas de diversas moléculas con respecto a sus imágenes especulares. Por ejemplo, las hélices de ADN siempre trazan los giros a la derecha, son dextrógiras, mientras que todos los seres vivos conocidos fabrican exclusivamente sus proteínas con aminoácidos levógiros. La materia inorgánica no suele mostrar esas preferencias. Los científicos han aprovechado esa diferencia para diseñar el FlyPol, un instrumento que con ayuda de la luz monitoriza la vida vegetal desde un helicóptero que vuela a gran velocidad desde más de un kilómetro de altura.

Cuando la luz incide y se refleja sobre un grupo de moléculas dotadas de la misma quiralidad, denominadas moléculas homoquirales, una parte de la luz sufre una polarización circular: las ondas reflejadas giran en el sentido de las agujas del reloj o en el contrario. Este espectropolarímetro mide la cantidad de luz que experimenta esa transformación cuando rebota de la superficie terrestre iluminada por el sol. La cantidad de luz polarizada que se detecta en un segmento de longitudes de onda constituye una huella dactilar que no solo revela el tipo de ser vivo (hierba, árbol o alga; FlyPol está calibrado para las plantas), sino que indica su estado de salud. Los objetos inanimados presentan perfiles sin características discernibles.

«La señal procedente de las plantas depende estrechamente de la estructura molecular a gran escala», explica Lucas Patty, astrobiólogo de la Universidad de Berna, autor principal del novedoso artículo de *Astronomy & Astrophysics* donde se describe el FlyPol. «Por ejemplo, si una planta sufre el rigor de la sequía, las membranas se hinchan un poco» y eso se traduce en unos picos de intensidad de la luz reflejada ligeramente aplanados. Patty asegura que la técnica servirá para valorar la salud de los ecosistemas afectados por el cambio climático, la desforestación o la propagación de especies invasoras.

Hasta fechas recientes solo era posible hacer mediciones estables en las condiciones controladas que ofrece un laboratorio, pues implicaban una fracción minúscula de la luz detectable. El FlyPol traslada el montaje de laboratorio al terreno. «En general los resultados son excelentes», opina Brett McGuire, astroquímico del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), que no ha participado en el estudio. «Han demostrado de modo bastante convincente que son capaces de distinguir las zonas llenas de vida de las que no lo están.»

Tal vez el mayor atractivo del método resida en la posibilidad de que con él algún día se pueda detectar vida en otros planetas. Hasta hoy no se conocen otros mecanismos que generen complejas señales de luz polarizada circular, aparte de las moléculas biológicas. Es posible que la vida exista en otros lugares sin moléculas homoquirales, pero la presencia de estas constituiría un sólido indicio de actividad biológica. «Es una de las pocas formas de detectar vida que básicamente está exenta de falsos positivos», explica Patty, aunque advierte que persisten trabas importantes antes de que el proceso de detección sea factible.

Según la astrofísica del MIT Sara Seager, ajena al estudio, la señal emitida por los planetas que orbitan alrededor de estrellas lejanas que llegue a la Tierra será extremadamente tenue. «Es aventurado decir que lograremos algo en la próxima generación de telescopios. Probablemente habrá que esperar un par de generaciones», sostiene. Pero Seager asegura que el método y el experimento, con mediciones reales de la vegetación, sienta las bases de cara al futuro estudio de mundos remotos.

Por ahora el paso siguiente será poner a prueba el FlyPol en más entornos, con la colaboración de un instrumento que mida las señales terrestres desde la Estación Espacial Internacional. Patty explica que «Desde ella la resolución espacial seguirá siendo bastante buena», por lo que cabe esperar señales intensas cuando sobrevuele la Amazonia y nulas cuando lo haga sobre la Antártida.

—Connie Chang



ABSTRACT AERIAL ART, GETTY IMAGES

La luz reflejada por este bosque de Australia indica que está lleno de vida.

COMPORTAMIENTO ANIMAL

Nido espumoso, nido dichoso

Algunas ranas evitan la desecación de la puesta con espuma

Quizás un moco espumoso no suene como el hogar más acogedor, pero para la progenie de algunas ranas es un refugio providencial contra la sequía. Los anfibios en general hacen la puesta en charcas porque los huevos blandos y gelatinosos precisan de agua para completar el desarrollo, pero en muchas ocasiones se secan. «La principal causa de muerte de los huevos es la desecación», explica John Gould, ecólogo de la Universidad de Newcastle.

Mientras estudiaba las ranas en las montañas Watagan, en Australia, a Gould le sorprendió encontrar charcas desecadas por el sol donde los huevos lograban sobrevivir durante días envueltos en nidos que sus madres «montaban» aireando secreciones mucosas con los dedos. «Vi patalear a los embriones vivos», relata.

Hasta ahora, el uso de la espuma por parte de diversas especies de ranas y sapos como medida protectora contra la desecación de los huevos era una mera suposición, con pocos estudios que lo hubiesen comprobado sobre el terreno. Así que Gould y sus colaboradores supervisaron 641 nidos de espuma fabricados por la rana de Fletcher (*Lechriodus fletcheri*) con el fin de averiguar si los embriones sobrevivían a las condiciones áridas de las montañas. De igual modo, llevaron a cabo los primeros experimentos de laboratorio donde siguieron con atención el desarrollo de los huevos en nidos privados de agua.

El equipo constató que los embriones conseguían crecer en las charcas desecadas si los huevos quedaban envueltos por la espuma babosa que segregaba la madre. En algunos nidos esparcidos por el suelo seco los embriones consiguieron incluso concluir el desarrollo, hasta que la charca cercana volvió a llenarse con las lluvias, y un puñado de ellos eclosionaron convertidos ya en renacuajos. «El nido de espuma actúa casi como un sistema de soporte vital que conserva la viabilidad de los huevos», afirma Gould. También han descubierto que los nidos grandes confieren mayor protección y que los huevos

ENERGÍA

Edificios recargables

Las construcciones de hormigón podrían usarse como baterías para almacenar energía eléctrica

El hormigón es, después del agua, el material más utilizado del mundo. Dado que ya nos rodea, los investigadores han estado explorando la idea de usarlo para almacenar electricidad, lo que equivaldría a construir edificios que actuasen como enormes baterías. La idea está cobrando fuerza a medida que muchos lugares van dependiendo cada vez más de la energía eólica y solar. Cuando amainan los vientos o cae la noche se precisan baterías recargables, pero estas suelen contener sustancias tóxicas poco respetuosas con el entorno.

Hasta ahora, las baterías experimentales de hormigón solo han logrado acumular una pequeña fracción de la energía que almacena una batería tradicional. En un trabajo reciente, sin embargo, un equipo ha descrito un prototipo de material recargable que podría aumentar la capacidad de almacenamiento más de diez veces con respecto a los intentos anteriores. Los resultados se publican en la revista *Buildings*.

La idea de una batería de hormigón que aloje a seres humanos puede parecer inverosímil. Sin embargo, «se puede construir una batería con una patata», apunta Aimee Byrne, ingeniera de estructuras de la Universidad de Tecnología de Dublín que no participó en el nuevo estudio. Dado que el futuro pasa por la sostenibilidad, a Byrne le agrada la idea de un edificio que evite el despilfarro al proporcionar cobijo y alimentar los dispositivos eléctricos al mismo tiempo.

«Se trata de añadir nuevas funciones al material de construcción actual, lo que me parece bastante prometedor», opina la coautora del estudio Emma Zhang, que trabajó en el diseño de la nueva batería en la Universidad de Tecnología Chalmers y ahora es científica en la empresa tecnológica Delta de Suecia. Ella y sus colaboradores imitaron el diseño de las sencillas pero duraderas baterías de níquel-hierro, o «baterías de Edison», en las que una solución electrolítica transporta iones entre unas placas de níquel con carga positiva y otras de hierro con carga negativa, para crear así un potencial eléctrico. En lugar del electrolito, los investigadores emplearon fibras de carbono conductoras mezcladas con el cemento (uno de los principales ingredientes del hormigón). También incrustaron capas de una malla de fibra de carbono recubierta de níquel o hierro para que actuaran a modo de placas.

Tal configuración demostró ser capaz de descargar la energía y volver a cargarse. «El hecho de que hayan logrado recargarla en cierta medida constituye un paso muy importante para llegar a lo que necesitamos», señala Byrne. Al igual que las baterías de Edison en las que se inspira (las cuales pueden funcionar durante décadas), el prototipo es duradero y resistente a la sobrecarga, asegura Zhang. «Podemos abusar de esta batería todo lo que queramos sin comprometer su rendimiento.»

Aunque el nuevo diseño supera en más de diez veces la energía que lograban almacenar los modelos previos, aún queda un largo camino por recorrer: 200 metros cuadrados de ese hormigón «pueden proporcionar en torno al 8 por ciento del consumo diario de electricidad» de un hogar típico de EE.UU., precisa Zhang.

Esa contribución no basta para competir con los dispositivos recargables actuales. «Se obtienen miliamperios [con las baterías basadas en cemento], no amperios», subraya Byrne. «[Eso equivale a] horas, en vez de días de carga.» Sin embargo, añade que «las baterías basadas en cemento aún están en mantillas en comparación con otras alternativas».

Las primeras baterías, incluidas las de Thomas Edison, eran simples y voluminosas. Los investigadores experimentaron con nuevos materiales y diseños durante más de un siglo hasta desarrollar los pequeños y eficientes dispositivos actuales. Byrne opina que el almacenamiento de energía basado en el hormigón podría experimentar una evolución similar. «Estamos mirando al futuro lejano. Pensando a largo plazo», concluye.

—*Sophie Bushwick*



Nido de espuma y ejemplar de rana de Fletcher.

situados en el centro de la masa sobreviven más tiempo. El nuevo trabajo se describe con detalle en *Ichthyology & Herpetology*.

Elisa Barreto Pereira, ecóloga en la Universidad Federal de Goiás, en Brasil, que no ha participado en el estudio, opina que los nidos de espuma podrían ser cruciales para asegurar la supervivencia de las ranas al cambio climático. «El nido es una adaptación importante» surgida varias veces en distintos grupos de anuros y en diversos continentes cuando la temperatura media del planeta ascendió como nunca antes hace unos 55 millones de años.

—Sandrine Ceurstemont

TECNOLOGÍA AMBIENTAL

Escuchar a las ballenas

Una nueva técnica para localizar cetáceos podría contribuir a su supervivencia

Quedan menos de 400 ballenas francas glaciales en libertad, y menos de 100 son hembras en edad reproductora. Las mayores amenazas para su supervivencia son los choques contra embarcaciones y los enredos en artes de pesca. Pero proteger estas ballenas desviando barcos para evitar encuentros peligrosos exige localizarlas de manera más fiable. Ahora, una nueva técnica descrita en *Journal of the Acoustical Society of America* podría ayudar a lograrlo.

Para escuchar la vida marina, los investigadores suelen instalar micrófonos subacuáticos llamados hidrófonos en boyas y planeadores robóticos. El audio así grabado se convierte después en un espectrograma: una representación visual del sonido que sirve para identificar, por ejemplo, las llamadas de determinadas especies de ballenas. Pero esos sonidos característicos suelen quedar ocultos entre otros ruidos. En los últimos años, los investigadores han usado una técnica de inteligencia artificial denominada aprendizaje profundo para automatizar ese análisis, pero el ruido de fondo sigue minando la fiabilidad.

En el nuevo trabajo, los investigadores han entrenado dos modelos de aprendizaje profundo para eludir el ruido. Empezaron suministrándoles miles de espectrogramas «limpios», que solo reflejaban las llamadas de las ballenas francas glaciales. Luego fueron añadiendo paulatinamente miles de espectrogramas contaminados con sonidos de fondo típicos, como el del motor de un petrolero. Según los científicos, los algoritmos resultantes pueden convertir los espectrogramas ruidosos en limpios, lo que reduciría las falsas alarmas y ayudaría a detectar las ballenas antes de que llegasen a zonas peligrosas.

A Shyam Madhusudhana, ingeniero de datos de la Universidad Cornell ajeno al estudio, le gustaría comprobar si esos modelos también sirven para localizar a otros mamíferos marinos. «Las ballenas jorobadas y los delfines poseen vías de expresión mucho más complejas que las ballenas francas», señala. Y Ben Milner, experto en aprendizaje automático de la Universidad de Anglia Oriental y coautor del estudio, pretende sacar esa tecnología fuera del agua y utilizarla en los bosques ucranianos, con la esperanza de identificar animales cerca del lugar donde se produjo la catástrofe de Chernóbil en 1986.

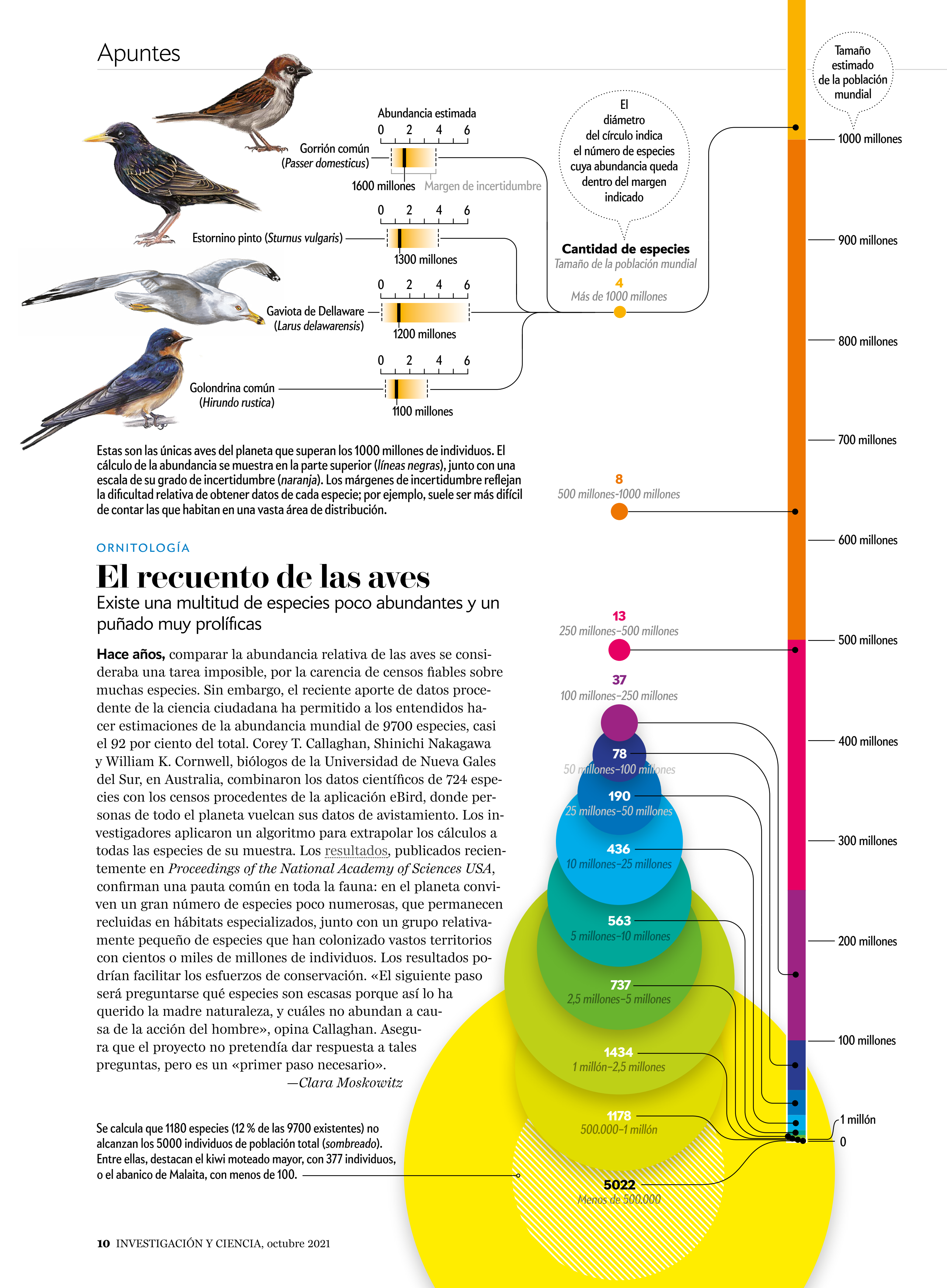
Peter Tyack, ecólogo del comportamiento de la Universidad de Saint Andrews que no participó en el trabajo, considera que se debería usar el nuevo sistema para averiguar dónde están las ballenas a lo largo del año, a fin de proteger esas zonas. «Esta técnica podría ser fantástica para calcular la densidad y abundancia de esas ballenas en lugares donde resulta difícil verlas», opina.

Con todo, Tyack advierte que ese no debería ser el único método para evitar las colisiones con los barcos o los enredos. En su trabajo, ha descubierto que las ballenas francas glaciales pueden permanecer calladas durante horas, por lo que sería fácil que una escapase a la vigilancia acústica pasiva. Y matar a unos pocos ejemplares, concluye, «podría conducir a la extinción de la población entera».

—Sam Jones


Ballenas francas glaciales.

JOHN GOULD (*nido de espuma*); NHP Y PHOTOSHOT, SCIENCE SOURCE (*rana*); FRANCOIS GOHIER Y VWPICS, ALAMY STOCK PHOTO (*ballenas*)



Estas son las únicas aves del planeta que superan los 1000 millones de individuos. El cálculo de la abundancia se muestra en la parte superior (*líneas negras*), junto con una escala de su grado de incertidumbre (*naranja*). Los márgenes de incertidumbre reflejan la dificultad relativa de obtener datos de cada especie; por ejemplo, suele ser más difícil de contar las que habitan en una vasta área de distribución.

Se calcula que 1180 especies (12 % de las 9700 existentes) no alcanzan los 5000 individuos de población total (*sombreado*). Entre ellas, destacan el kiwi moteado mayor, con 377 individuos, o el abanico de Malaita, con menos de 100.

ORNITOLOGÍA

El recuento de las aves

Existe una multitud de especies poco abundantes y un puñado muy prolíficas

Hace años, comparar la abundancia relativa de las aves se consideraba una tarea imposible, por la carencia de censos fiables sobre muchas especies. Sin embargo, el reciente aporte de datos procedente de la ciencia ciudadana ha permitido a los entendidos hacer estimaciones de la abundancia mundial de 9700 especies, casi el 92 por ciento del total. Corey T. Callaghan, Shinichi Nakagawa y William K. Cornwell, biólogos de la Universidad de Nueva Gales del Sur, en Australia, combinaron los datos científicos de 724 especies con los censos procedentes de la aplicación eBird, donde personas de todo el planeta vuelcan sus datos de avistamiento. Los investigadores aplicaron un algoritmo para extrapolar los cálculos a todas las especies de su muestra. Los resultados, publicados recientemente en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, confirman una pauta común en toda la fauna: en el planeta conviven un gran número de especies poco numerosas, que permanecen recluidas en hábitats especializados, junto con un grupo relativamente pequeño de especies que han colonizado vastos territorios con cientos o miles de millones de individuos. Los resultados podrían facilitar los esfuerzos de conservación. «El siguiente paso será preguntarse qué especies son escasas porque así lo ha querido la madre naturaleza, y cuáles no abundan a causa de la acción del hombre», opina Callaghan. Asegura que el proyecto no pretendía dar respuesta a tales preguntas, pero es un «primer paso necesario».

—Clara Moskowitz

PSICOLOGÍA

Sanar a través de los cuentos

Escuchar relatos mitiga el dolor y el estrés en los niños hospitalizados

Padres, profesores y cuidadores aseguran desde hace mucho tiempo que los cuentos son un remedio mágico para calmar y adormecer a los niños. Ahora, investigadores que trabajan en unidades de cuidados intensivos pediátricos han cuantificado los beneficios fisiológicos y psicológicos de un relato bien contado.

«Sabemos que la narrativa tiene la facultad de transportarnos a otros mundos», dice Guilherme Brockington, estudioso de las emociones y del aprendizaje en la Universidad Federal de ABC en São Paulo y autor principal del nuevo artículo, publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. En anteriores estudios se afirmaba que los cuentos ayudan a los niños a procesar y controlar sus emociones, pero la mayoría habían tenido lugar en entornos de ensayo, donde los participantes respondían preguntas mientras al mismo tiempo eran sometidos a una resonancia magnética funcional. Según Brockington, «no hay muchos estudios que hayan abordado los efectos fisiológicos y psicológicos de la narración de cuentos» en un contexto hospitalario más cotidiano.

Por ello varios investigadores que trabajan en hospitales brasileños dividieron en dos grupos a 81 pacientes de entre cuatro y 11 años que recibieron la atención de cuentacuentos con una década de experiencia en hospitales. En un grupo, el narrador jugaba a acertijos y adivinanzas con cada niño. En el otro, cada pequeño elegía un libro y escuchaba la narración en voz alta. Antes y después de las sesiones, los investigadores tomaron muestras de saliva de los niños y se les pidió que describieran la intensidad del dolor y, por último, realizaron una tarea de asociación libre de palabras.

Las dos intervenciones reportaron beneficios tangibles en ambos grupos, pues los niveles de cortisol (hormona del estrés) descendieron y los de oxitocina (hormona asociada al bienestar y la empatía) ascendieron, pero los más beneficiados fueron los integrantes del grupo de los cuentos, pues sus niveles de cortisol supusieron una cuarta parte de los del grupo de las adivinanzas, y los de oxitocina casi duplicaron los de estos. Los oyentes de los cuentos también refirieron un alivio del dolor que casi duplicaba el de los participantes en las adivinanzas y describieron con palabras más positivas su ingreso en el hospital.

El estudio demuestra que la participación en juegos o la simple interacción con alguien relaja a los niños y mejora su actitud, pero que escuchar cuentos tiene un efecto especialmente notorio. Los investigadores «intentaron controlar el componente de relación social del narrador, donde creo que reside la clave», afirma Raymond Mar, psicólogo en la Universidad de York en Canadá que estudia los efectos de la narración de cuentos pero que no ha participado en el nuevo estudio.

Como paso siguiente, los autores planean estudiar la duración de dichos efectos, junto con los posibles beneficios de la narración de cuentos en niños aquejados de ciertas enfermedades, como el cáncer. De momento, Brockington afirma que todo indica que la narración es un modo económico y sumamente eficaz de mejorar los resultados clínicos en contextos diversos. Mar coincide: «Es muy alentador y posiblemente generalizable».

—Susan Cosier



THOMAS FUCHS



Esqueleto de la cesta de flores de Venus.

DINÁMICA DE FLUIDOS

Los secretos de las esponjas de mar

Una romántica esponja puede enseñarnos mucha ingeniería

Aunque su exterior se compone de intrincadas fibras de vidrio, las esponjas conocidas como canastas de flores de Venus (*Euplectella aspergillum*) son más famosas por algo que a menudo se halla en su interior: una pareja reproductora de camarones que quedan atrapados en el cuerpo con forma de lámpara de lava de la esponja y pasan a vivir allí de forma simbiótica. Esta romántica peculiaridad biológica es la razón por la que estas esponjas de aguas profundas se ofrecen como regalo de boda en Japón, y también por la que un equipo de ingenieros sintió curiosidad por saber cómo pasa el agua a través de su cuerpo, ayudando así a que prosperen sus inquilinos cautivos.

El equipo suponía que los llamativos patrones de crestas y orificios de las esponjas alteraban el flujo de agua alrededor y dentro de ellas. Pero realizar un experimento bajo el agua a fin de determinar el efecto de cada uno de esos atributos estructurales no resultaba factible, así que usaron uno de los superordenadores más potentes de Italia para llevar a cabo una serie de simulaciones, desarrolladas a lo largo de un decenio. «Aquí es donde una simulación se muestra más útil, cuando hay algo que no podemos estudiar con experimentos», afirma Sauro Succi, investigador principal del Instituto Italiano de Tecnología en Roma y coautor del nuevo estudio, publicado en *Nature*.

Los investigadores elaboraron un modelo virtual tridimensional basado en mediciones de esponjas reales. Luego simularon el paso de miles de millones de partículas a través de él, con y sin las crestas y los agujeros. Descubrieron que la estructura reticular porosa de la esponja reduce la resistencia del flujo del agua, y que las crestas moderan la fuerza del agua y crean pequeños vórtices en el interior del animal. Esos remolinos permiten que se mezclen los óvulos y el esperma de la esponja, y que tanto esta como los camarones que aloja se alimenten de forma más eficiente.

Según el primer autor del estudio, Giacomo Falcucci, de la Universidad de Roma Tor Vergata, este «doble beneficio» en relación con la durabilidad y la fertilidad les sorprendió, porque las adaptaciones evolutivas para aumentar el éxito reproductivo suelen perjudicar a los organismos en otros aspectos. La atractiva pero pesada cola del pavo real constituye un buen ejemplo de ello.

«Es realmente interesante ver que esa compleja morfología tiene implicaciones en la dinámica de fluidos», afirma Laura Miller, matemática e ingeniera biomédica de la Universidad Estatal de Arizona, que no participó en el estudio pero que escribió un comentario sobre él en *Nature*.

En futuros estudios, este método de simulación podría aplicarse a otros organismos cuya dinámica de fluidos nunca se ha estudiado en detalle. Miller propone como posible objetivo la intrincada arquitectura de los arrecifes de coral. Además, las canastas de flores de Venus ya han inspirado biomateriales, como una rejilla impresa en 3D que logró soportar más carga sin combarse que las estructuras de los puentes actuales. Los autores esperan que conocer las propiedades que reducen la resistencia en estas esponjas sirva para mejorar el diseño de los rascacielos, submarinos y naves espaciales del mañana.

—Maddie Bender

AGEFOTOSTOCK. ALAMY STOCK PHOTO

Incendios y calentamiento

Los incendios forestales actuales nos están llevando a un territorio desconocido

Este verano, el humo de los bosques en llamas ha sido protagonista en varias partes del mundo. Ello ha suscitado una pregunta: ¿cuánto más pueden empeorar las temporadas de incendios? Philip Higuera, paleoecólogo experto en incendios de la Universidad de Montana, lleva toda su carrera tratando de determinar la respuesta a partir de datos históricos. «Si todos nos preguntamos qué ocurrirá ahora que se están calentando nuestros bosques, veamos qué sucedió cuando se calentaron en el pasado», comenta.

Los bosques subalpinos de las Montañas Rocosas centrales crecen en condiciones frescas y húmedas y no arden tan fácilmente como los de las tierras bajas. Para averiguar la frecuencia con que se han incendiado esos resistentes bosques a lo largo de la historia, Higuera y sus colaboradores combinaron los registros de incendios modernos observados por satélite, las cicatrices que ha imprimido el fuego en los anillos de los árboles desde el siglo XVII, y las partículas de carbón vegetal que se depositaron en los lagos durante miles de años. Descubrieron que, entre 2000 y 2020, los bosques ardieron un 22 por ciento más rápido que durante un período de calentamiento inusual que comenzó en el año 770 de nuestra era y que hizo que la región alcanzara las temperaturas más altas previas al siglo XXI. Por sí solos, los fuegos de 2020 dan cuenta de la mayor parte de ese aumento en la tasa de combustión, así como del 72 por ciento de la superficie total quemada entre 1984 y 2020.

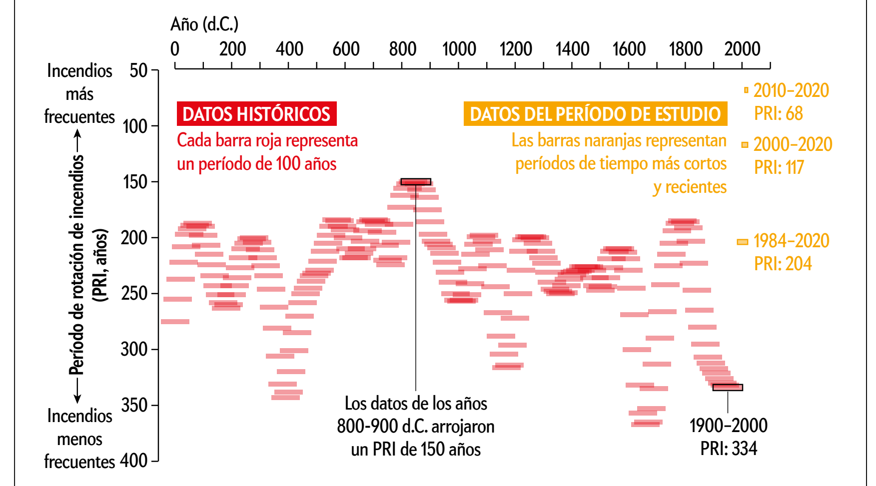
En general, esos bosques no han ardido con frecuencia, pero esa situación ha cambiado en las dos últimas décadas. El tiempo transcurrido entre los años de incendios extremos en EE.UU. está disminuyendo a medida que el planeta se calienta, e Higuera no cree que esa pauta vaya a invertirse en un futuro próximo. La nueva investigación se ha publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences*. A Higuera no le sorprenden las recientes temporadas de incendios sin precedentes, pero sí le angustian. «Llevo veinte años escribiendo sobre esto», señala. «Pero no llevo veinte años pensando en cómo me haría sentir.»

El trabajo muestra que el pasado ya no puede servirnos de guía a la hora de entender y gestionar los incendios forestales, afirma Rosemary Sherriff, geógrafa ambiental de la Universidad Estatal Humboldt que no participó en el estudio. «Debemos aceptar que veremos más incendios», advierte, «y adaptarnos a la nueva norma.» Muchas comunidades afectadas por los recientes incendios forestales cuentan con planes de protección contra incendios, añade Higuera, pero estos «se basan en nuestras expectativas de que esos bosques arderán una vez cada varios siglos. Esa no es la situación actual. Y no es hacia donde nos encaminamos».

—Rebecca Dzombak

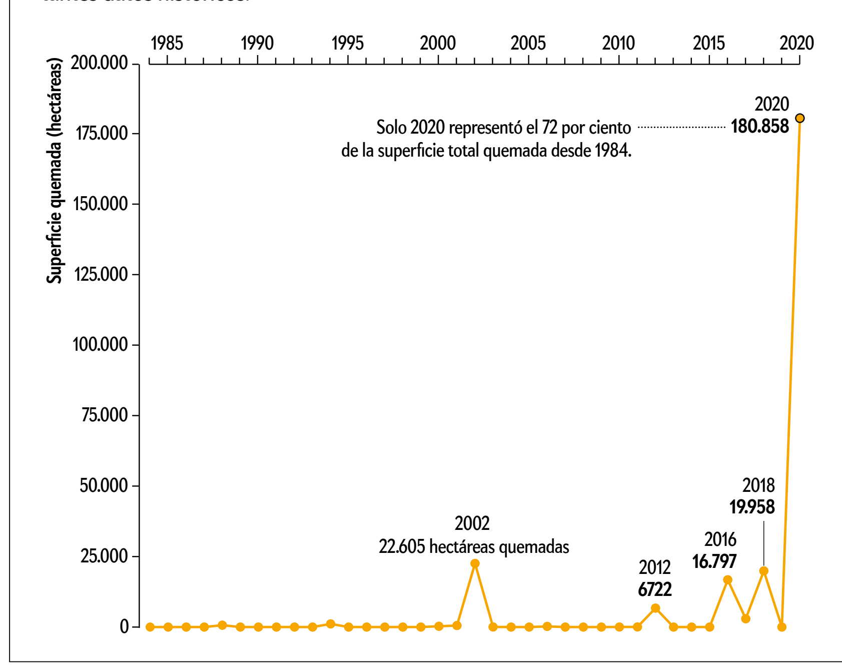
Un registro de 2000 años

El período de rotación de incendios (PRI) es el tiempo que tardaría en arder una superficie con un tamaño dado si la quema prosiguiera a un ritmo fijo. Un valor menor significa que el terreno tarda menos años en quemarse. El PRI suele basarse en datos de muchos años, ya que de un año a otro pueden producirse fluctuaciones importantes. En este gráfico, las barras rojas muestran los PRI calculados para intervalos de 100 años hasta el año 2000. Las barras naranjas representan intervalos más cortos entre 1984 y 2020.



Superficie quemada en bosques subalpinos, 1984-2020

El gráfico muestra la superficie total que se quemó cada año en los bosques subalpinos de cierta región de las Montañas Rocosas centrales, una zona para la que existen bastantes datos históricos.



FUENTES: «ROCKY MOUNTAIN SUBALPINE FORESTS NOW BURNING MORE THAN ANY TIME IN RECENT MILLENNIA»; PHILIP E. HIGUERA, BRYAN N. SHUMAN Y KYRA D. WOLF EN *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES*, VOL. 118, ART. E2103135118, JUNIO DE 2021 (*datos y código del estudio*); AMANDA MONTAÑEZ (*gráfico*)

MEDICINA

Mascarilla detectora

Circuitos biológicos integrados en la indumentaria detectarían el SARS-CoV2 y otros patógenos

Las mascarillas y los análisis de detección han sido elementos esenciales de la respuesta contra la pandemia de la COVID-19, y todo indica que no tardarán en aparecer los dispositivos que reúnan ambos. Investigadores de la Universidad Harvard y del Instituto de Tecnología de Massachusetts han ideado con técnicas de la biología sintética una mascarilla que detecta con fiabilidad el virus de la COVID.

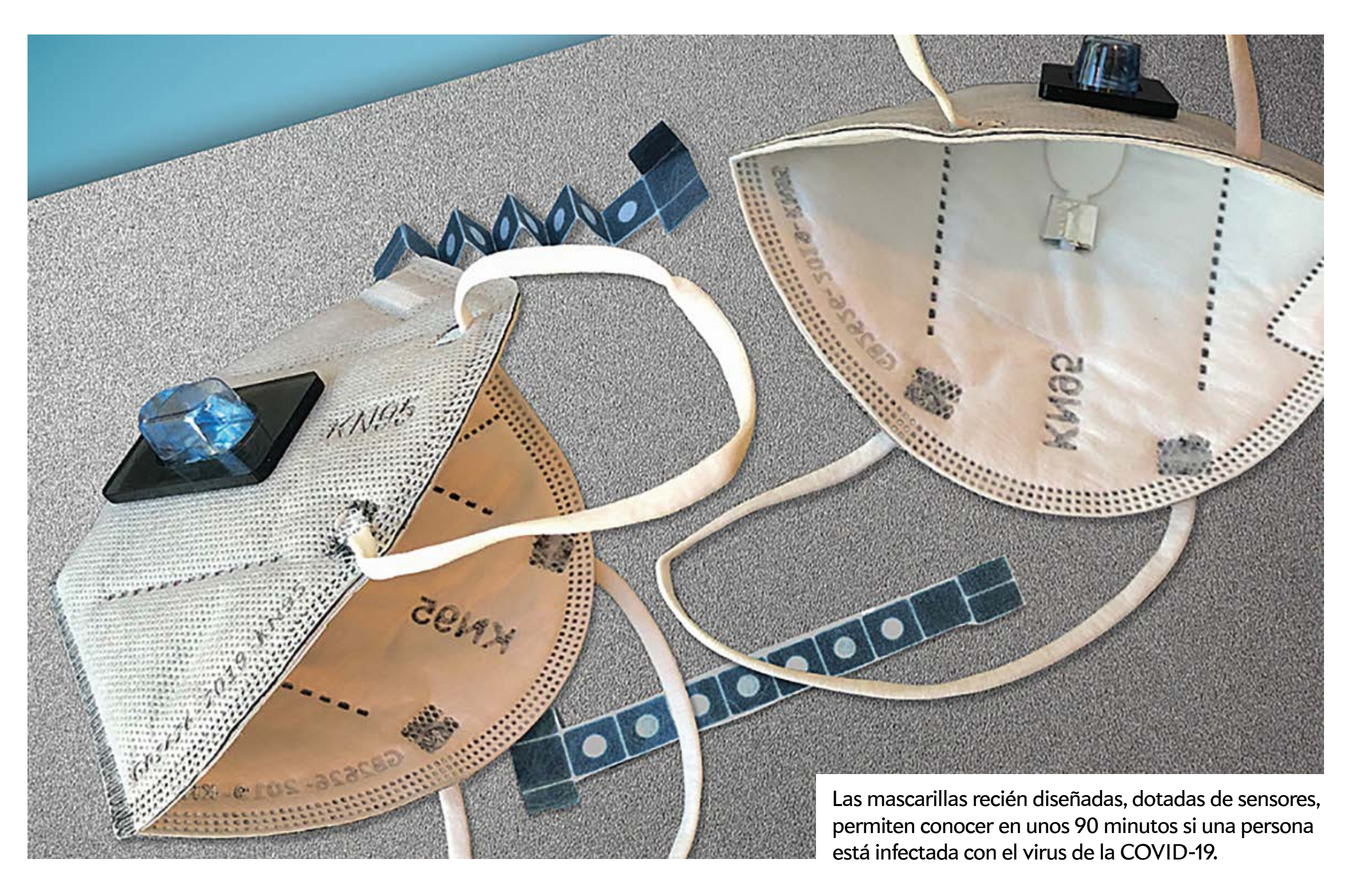
Los especialistas en biología sintética crean dispositivos e instrumentos con componentes biológicos, tales como sensores que detectan ciertas secuencias genéticas. En tentativas precedentes se habían logrado integrar bacterias genomodificadas en esos sensores, pero las células eucariotas plantean dificultades añadidas, como su nutrición o riesgos biológicos más acusados. Los frutos de esta nueva investigación son dispositivos portables a base de circuitos liofilizados carentes de células y elaborados con genes, enzimas y otros componentes celulares, que pueden incorporarse a materiales flexibles y porosos de fácil conservación. (En 2014 describieron la integración de circuitos de este tipo en papel.) «La importancia del trabajo reside en que convierte un avance de laboratorio en dispositivos portátiles», afirma la bioingeniera Xinyue Liu, que desarrolla sensores vivientes en el MIT y no ha participado en el novedoso estudio. Instrumentos así podrían simplificar los análisis in situ.

Publicado en *Nature Biotechnology*, el artículo describe la incorporación de sensores carentes de células en vendajes elásticos o en papel que detectarían el virus causante de la COVID-19, el del ébola, los SARM, venenos nerviosos, etcétera. Algunos de esos sensores, como los usados en la nueva mascarilla que detecta el SARS-CoV2, se basan en la técnica CRISPR: cuando los ARN «guía» coinciden con el ADN diana, activan una enzima que corta los ácidos nucleicos (la cadena de letras del ADN). Esta enzima en concreto también corta otros ácidos nucleicos cercanos, liberando una proteína fluorescente que emite luz. La técnica ofrece versátiles sensores «programables», susceptibles de ser adaptados con rapidez a la detección de nuevas variantes víricas.

El prototipo de la mascarilla se activa con un botón que rehidrata el sensor e inicia así las reacciones que descomponen el virus y amplifican su ADN, que será detectado. El proceso entero provoca un cambio de color a los 90 minutos de la activación, después de haber colocado la máscara a un paciente hospitalizado, por ejemplo. «El aliento es una buena fuente para obtener muestras no invasivas y en cantidades adecuadas. La aplicación se ajusta perfectamente a la situación actual», afirma Can Dincer, experto en sensores de la Universidad de Friburgo, ajeno al estudio.

La sensibilidad ha resultado ser parecida a la de la mayoría de las pruebas de laboratorio. «El método de referewncia seguiría siendo la PCR hecha en el laboratorio, pero estamos dentro de márgenes razonables», afirma el bioingeniero y autor senior James Collins. Las mascarillas de un solo uso no precisan electricidad ni personal experto, y funcionan a la temperatura y la humedad ambiente.

Collins espera comercializarlas a unos cinco dólares la unidad. Añade que los circuitos genéticos incorporados en la ropa serían de ayuda para los equipos de primeros auxilios, los sanitarios y el personal militar, entre otros colectivos de profesionales. —*Simon Makin*



Las mascarillas recién diseñadas, dotadas de sensores, permiten conocer en unos 90 minutos si una persona está infectada con el virus de la COVID-19.

FELICE FRANKEL Y OFICINA DE NOTICIAS DEL MIT

INMUNOLOGÍA

Los autoanticuerpos, implicados en la mortalidad por COVID-19

Los anticuerpos dirigidos contra el propio organismo atacan a los interferones de tipo 1, que desempeñan un papel fundamental en la lucha contra las infecciones

DIANA KWON



Profesionales médicos atienden a un paciente con COVID-19 en una unidad de cuidados intensivos.

GETTY IMAGES/GEORGIY-DATSENKO/ISTOCK

En algunas personas infectadas por el virus SARS-CoV-2, los anticuerpos que se vuelven contra elementos de las propias defensas inmunitarias son un factor clave de la enfermedad grave y la mortalidad, según un amplio estudio internacional. Estos anticuerpos no deseados, conocidos como autoanticuerpos, también están presentes en una pequeña proporción de las personas sanas y no infectadas, y su prevalencia aumenta con la edad, lo que puede ayudar a explicar por qué las personas de edad avanzada corren un mayor riesgo de contraer la COVID-19.

Los resultados, publicados el 19 de agosto en *Science Immunology*, aportan pruebas sólidas que respaldan una observación realizada el pasado mes de octubre por el mismo equipo de investigación. Dirigidos por el inmunólogo Jean-Laurent Casanova, de la Universidad Rockefeller de Nueva York, los investigadores descubrieron que alrededor del 10 por ciento de las personas con COVID-19 grave presentaban autoanticuerpos que atacaban y bloqueaban la acción de los interferones de tipo 1, unas proteínas de la sangre que desempeñan una función esencial en la lucha contra las infecciones víricas.

«El informe inicial del año pasado fue probablemente uno de los trabajos más importantes de la pandemia», afirma Aaron Ring, inmunólogo de la Escuela de Medicina de Yale en New Haven, Connecticut, que no participó en este trabajo. «Lo que han hecho en esta nueva investigación es indagar cuán comunes son estos anticuerpos en la población ge-

neral, y resulta que son asombrosamente prevalentes.»

El equipo se centró en la detección de autoanticuerpos que pudieran neutralizar concentraciones más bajas y fisiológicamente relevantes de interferones. Estudiaron a 3595 pacientes de 38 países con COVID-19 crítico, aquellos que estaban lo suficientemente enfermos como para ser ingresados en una unidad de cuidados intensivos. En general, el 13,6 por ciento de ellos poseía autoanticuerpos, y esa proporción variaba entre el 9,6 por ciento, en los menores de 40 años, y el 21 por ciento, en los mayores de 80. Los autoanticuerpos también estaban presentes en el 18 por ciento de las personas que habían fallecido a causa de la enfermedad.

Casanova y sus colaboradores sospechaban que estos anticuerpos aberrantes eran una causa, más que una consecuencia, de la COVID-19 crítica. Así lo sugerían algunos indicios: con anterioridad, los investigadores habían observado que 4 de cada 1000 personas sanas, cuyas muestras se habían obtenido antes de la pandemia, presentaban autoanticuerpos. El equipo también descubrió que los individuos con mutaciones genéticas que alteran la actividad de los interferones de tipo 1 corren un mayor riesgo de padecer COVID-19 grave y potencialmente mortal.

Para examinar más a fondo esta relación, los autores buscaron autoanticuerpos en un gran conjunto de muestras de sangre tomadas a casi 35.000 personas sanas antes de la pandemia. Descubrieron que el 0,18 por ciento de las que tenían una edad de entre 18 y 69 años exhibían autoanticuerpos contra el interferón de tipo 1, y que esta proporción aumentaba con la edad: en alrededor del 1,1 por ciento de las personas de entre 70 y 79 años, y en el 3,4 por ciento de las mayores de 80 años.

«La prevalencia aumenta enormemente» con la edad, afirma Casanova. «Esto explica en gran medida el alto riesgo de COVID grave en las personas mayores». El experto añade que estos hallazgos tienen claras implicaciones clínicas, y sugiere que los hospitales deberían comprobar la presencia de estos autoanticuerpos en los pacientes, así como de mutaciones implicadas en el bloqueo de los interferones de tipo 1. Ello permitiría identificar a las personas que tienen más probabilidades de enfermar gravemente a causa de la COVID-19, lo que ayudaría a los médicos a adaptar el tratamiento en cada caso.

Una muestra de más de 30.000 personas es «demasiado grande para ignorarla», según Ring. «Sin duda demuestra que es un aspecto en el que tenemos que pensar.» Añade que a partir de ahora debería considerarse si los autoanticuerpos también intervienen en la evolución de otras enfermedades infecciosas. El equipo de Ring ya ha hallado pruebas de autoanticuerpos contra varios componentes del sistema inmunitario en personas con COVID-19, y él y sus colaboradores están indagando en la cuestión. «Sospecho que apenas hemos empezado a arañar la superficie.»

***Diana Kwon** es periodista científica. Escribe sobre temas de salud, biología y ciencias afines.*

Artículo original publicado en *Nature* vol. 597, pág. 162, 2021. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2021

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Autoantibodies neutralizing type I IFNs are present in ~4% of uninfected individuals over 70 years old and account for ~20% of COVID-19 deaths. Paul Bastard et al. en *Science Immunology*, vol. 6, agosto de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

¿Por qué la COVID-19 resulta a veces mortal? La incertidumbre dificulta la elección de los tratamientos. Heidi Ledford en *Actualidad científica*, 16 de abril de 2020.

Los estragos inmunitarios de la COVID-19. Akiko Iwasaki y Patrick Wong en *IyC*, marzo de 2021.

EVOLUCIÓN HUMANA

La genética ofrece pistas sobre la evolución de la homosexualidad

Un estudio halla que los marcadores genéticos asociados al comportamiento homosexual podrían favorecer la reproducción en las personas heterosexuales. No todos los científicos comparten las conclusiones

SARA REARDON

Para los biólogos evolutivos, la genética de la homosexualidad no deja de resultar paradójica. En teoría, las personas o los animales que solo se sienten atraídos hacia individuos de su mismo sexo no deberían tener mucha descendencia biológica, por lo que cualquier factor genético que predisponga a la homosexualidad lo tendrá difícil para transmitirse a las generaciones futuras. Sin embargo, la homosexualidad está extendida entre los seres humanos y numerosas investigaciones han indicado que, al menos en parte, tiene un componente genético.

Ahora, un estudio con cientos de miles de participantes ha identificado varios patrones genéticos asociados al comportamiento homosexual y ha hallado que, en las personas heterosexuales, esos mismos patrones genéticos parecen estar vinculados a haber tenido un mayor número de parejas sexuales a lo largo de la vida, un rasgo que favorecería la reproducción. Los autores sostienen que sus resultados, publicados en *Nature Human Behaviour*, podrían ayudar a entender por qué el componente genético que predispone a la homosexualidad ha continuado transmitiéndose a lo largo de las generaciones. Por su parte, otros científicos cuestionan que los datos disponibles permitan extraer conclusiones definitivas.

En el nuevo trabajo, Brendan Zietsch, genetista evolutivo de la Universidad de Queensland (Australia), y sus colaborado-



VARIOS ESTUDIOS han señalado que el comportamiento homosexual tiene un componente genético hereditario. Hasta ahora, sin embargo, los investigadores ignoran qué mecanismo hace que dicho componente genético se transmita de generación en generación.

GETTY IMAGES/MIXMIKE/ISTOCK

res usaron datos del Biobanco del Reino Unido, del Estudio Longitudinal Nacional de Salud de Adolescentes a Adultos de EE.UU. y de la compañía de genómica 23andMe, con sede en California. Tales datos incluían secuencias de genomas y cuestionarios sobre el comportamiento sexual de los participantes. Los investigadores analizaron el genoma de 477.522 personas que dijeron haber mantenido relaciones sexuales con alguien de su mismo sexo al menos una vez en la vida, y luego compararon los resultados con los genomas de 358.426 individuos que declararon haber mantenido exclusivamente relaciones heterosexuales. El estudio solo tuvo en cuenta el sexo biológico, no el género, y no incluyó a aquellos participantes cuyo género y sexo no coincidían.

En un trabajo publicado en 2019, el grupo de Zietsch halló que las personas que habían mantenido relaciones homosexuales al menos una vez en la vida tendían a compartir patrones de pequeñas diferencias genéticas dispersas por el genoma. Por sí sola, ninguna de esas variaciones parecía afectar en gran medida al comportamiento sexual, lo que respaldaba estudios previos que no habían encontrado indicios de la existencia de un «gen gay». Sin embargo, el conjunto de patrones genéticos sí parecía tener un moderado efecto global que, según el estudio, explicaba entre el 8 % y el 25 % de la variación en la conducta homosexual.

En el nuevo trabajo, los investigadores han usado un algoritmo informático para simular la evolución humana a lo largo de 60 generaciones. Al hacerlo, hallaron que el conjunto de variaciones genéticas asociadas al comportamiento homosexual tendría que haber desaparecido a menos que, de algún modo, ayudara a las personas a sobrevivir o a reproducirse.

Homosexualidad y número de parejas

Zietsch y su equipo se propusieron analizar si esos mismos patrones genéticos podrían otorgar alguna ventaja evolutiva. En concreto, se preguntaron si podrían estar relacionados con el número de parejas sexuales que tiene una persona a lo largo de la vida. Para ello, clasificaron a los participantes que solo habían mantenido relaciones heterosexuales en función del número de parejas que dijeron haber tenido. Al analizar los datos, encontraron que quienes habían tenido muchas parejas tendían a compartir algunos de los marcadores genéticos previamente observados en quienes habían mantenido relaciones homosexuales.

Los autores también descubrieron que las personas que habían mantenido relaciones homosexuales compartían marcadores genéticos con aquellas que se describían a sí mismas como arriesgadas y abiertas a nuevas experiencias. Además, constataron un pequeño solapamiento entre las personas heterosexuales que mostraban patrones genéticos asociados a la homosexualidad y aquellas a quienes los entrevistadores calificaron como físicamente atractivas. Zietsch sugiere que algunos rasgos como el carisma o el impulso sexual podrían tener un componente genético que se solapa con el asociado al comportamiento homosexual. Con todo, advierte de que tales rasgos no se incluyeron en los datos, por lo que «no es más que una suposición».

Los autores reconocen muchas de las limitaciones del estudio. En primer lugar, todos los participantes vivían en el Reino Unido o en EE.UU. y eran de ascendencia europea. Y los cuestionarios preguntaban

por el comportamiento sexual, no por la orientación sexual. Además, la mayoría de los participantes nacieron en una época en que la homosexualidad era ilegal o tabú en sus respectivos países, por lo que muchas de las personas que se sentían atraídas hacia otras de su mismo sexo pudieron no haberse comportado nunca conforme dicha atracción. En tal caso, el estudio las habría calificado de manera errónea como puramente heterosexuales.

Julia Monk, ecóloga y bióloga evolutiva de la Universidad Yale, cree que tales limitaciones son tan importantes que impiden extraer conclusiones realistas sobre la relación entre genética y orientación sexual. La investigadora añade que, en las sociedades modernas, la reproducción y el comportamiento sexual ejercen un papel muy diferente del que pudieron haber tenido para nuestros ancestros, lo que hace muy difícil determinar su influencia en la evolución humana. Por ejemplo, dado que hoy muchas enfermedades de transmisión sexual tienen cura, es posible que las personas tengan más parejas sexuales que en el pasado. Y la existencia de métodos de control de la natalidad y tratamientos de fertilidad anula muchas de las ventajas reproductivas que podrían proporcionar los genes. «El comportamiento de la gente en lo que respecta al sexo y la reproducción se encuentra muy influido por la cultura, por lo que indagar en la genética puede que resulte casi imposible», sostiene Monk.

Vínculos débiles

Qazi Rahman, psicólogo del King's College de Londres, cree que el nuevo trabajo está bien realizado, pero se muestra escéptico con algunas de sus conclusiones. Opina que los conjuntos de datos estaban demasiado sesgados hacia aquellas personas dispuestas a revelar su comportamiento sexual a los entrevistadores, lo que en sí mismo podría considerarse un «comportamiento de riesgo» que pudo haber acabado reflejado en los datos genéticos. Rahman añade que, una vez que los datos se desglosan en hombres y mujeres, y en aquellos que solo han tenido parejas del mismo sexo frente a quienes han mantenido relaciones homosexuales, el número de personas en cada grupo se vuelve tan pequeño que los vínculos genéticos se debilitan.

Dean Hamer, genetista retirado que publicó algunos de los primeros estudios sobre la genética de la orientación sexual, se muestra decepcionado por el estudio. Opina que definir la orientación sexual sobre la base de una única relación con alguien del mismo sexo no constituye una manera útil de clasificar a las personas, ya que muchos individuos que se identifican como heterosexuales han experimentado alguna vez una relación con alguien de su mismo sexo. «Ni siquiera se está haciendo la pregunta correcta a las personas adecuadas», afirma. En cambio, sí cree que los investigadores han encontrado marcadores genéticos asociados a la apertura a nuevas experiencias, lo que podría explicar el solapamiento entre las personas que han tenido una pareja homosexual y aquellos individuos heterosexuales que han tenido muchas parejas.

Zietsch sostiene que la inclinación a asumir riesgos solo puede explicar una parte del vínculo estadístico entre los marcadores asociados a las relaciones homosexuales y aquellos relacionados con el número de parejas. Y admite que emplear una única experiencia homosexual como indicador de la orientación sexual de una persona no es lo más idóneo, pero explica que se hizo así porque el Biobanco del Reino Unido no incluía datos sobre la orientación sexual. No obstante, el análisis de los datos de la compañía 23andMe reveló una fuerte superposición genética entre quienes refirieron experiencias homosexuales y quienes se describieron como atraídos hacia personas de su mismo sexo, lo que sugiere que los mismos genes controlarían ambos factores.

Hamer reconoce que relacionar un comportamiento complejo con la genética es extremadamente difícil, pero se alegra de que los autores se hayan decidido a investigar la orientación sexual. «Está muy poco estudiada, más aún teniendo en cuenta que se trata de una fuerza motriz de la especie humana», razona. «Es una buena pregunta, solo que no han encontrado una respuesta.»

Sara Reardon *es periodista científica de* Nature.

Artículo original publicado en *Nature* vol. 597, págs. 17-18, 2021.
Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2021

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Genomic evidence consistent with antagonistic pleiotropy may help explain the evolutionary maintenance of same-sex sexual behaviour in humans. Brendan P. Zietsch et al. En *Nature Human Behaviour*, 23 de agosto de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

El contínuum de la homosexualidad. Robert Epstein en *MyC* n.º 23, 2007.
Más allá de XX y XY. Amanda Montañez en *IyC*, noviembre de 2017.
Niños transgénero. Kristina R. Olson en *IyC*, noviembre de 2017.

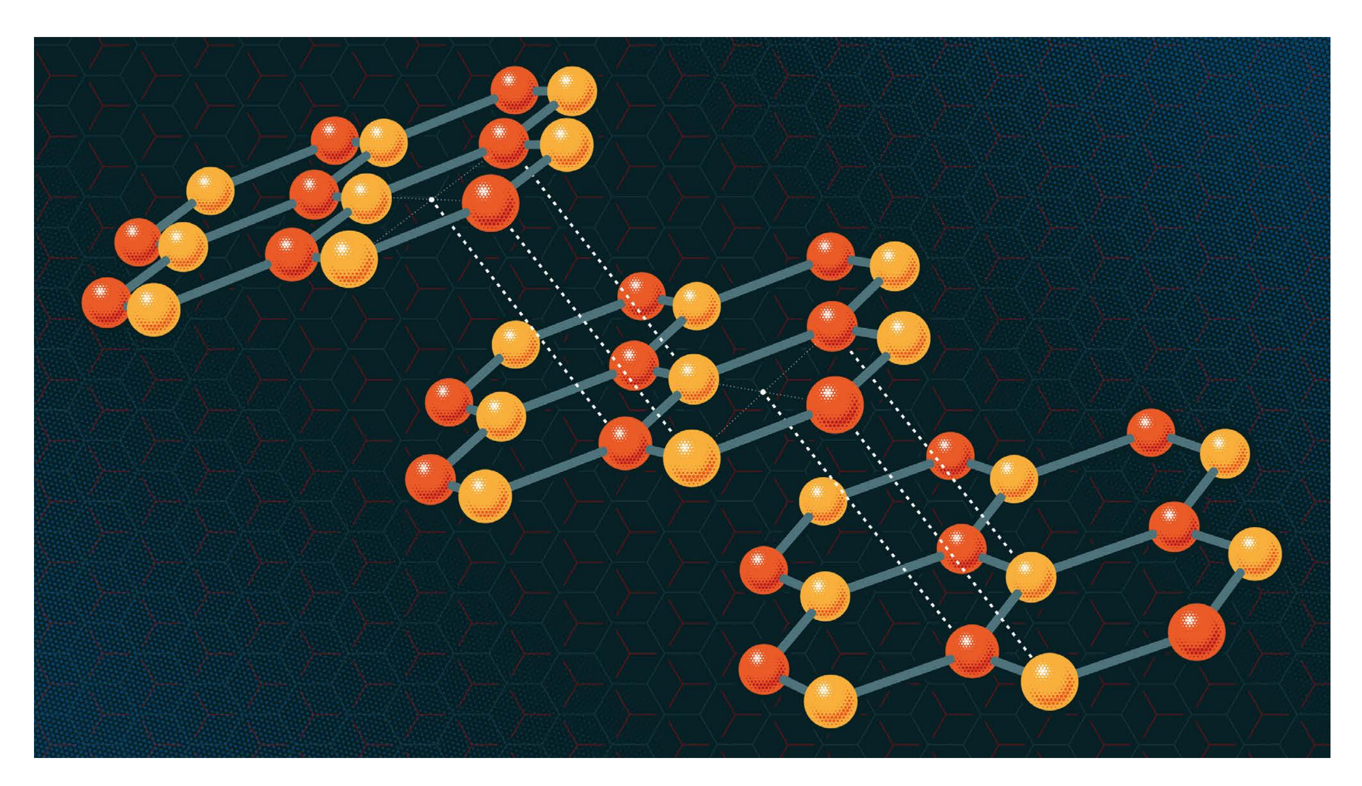
FÍSICA DE MATERIALES

La superconductividad en el grafeno podría ser menos exótica de lo esperado

El hallazgo de superconductividad en capas de grafeno no rotadas sugiere que las propiedades superconductoras de este material podrían ser mundanas

CHARLIE WOOD

Hace tres años, los físicos descubrieron que dos láminas de grafeno superpuestas y rotadas entre sí un pequeño ángulo de 1,1 grados podían mostrar una deslumbrante variedad de comportamientos. El más llamativo de ellos era que, una vez enfriado a muy bajas temperaturas, el material comenzaba a conducir la electricidad con resistencia cero.



EL GRAFENO TRICAPA ABC (*ilustración*) se torna superconductor a temperaturas próximas al cero absoluto. En esta disposición, las sucesivas capas no están giradas entre sí, sino desplazadas.

SAMUEL VELASCO, *QUANTA MAGAZINE*

Los investigadores se apresuraron a averiguar por qué el grafeno bicapa rotado manifestaba una superconductividad que, además, parecía ser especialmente robusta. No pocos teóricos de materiales pensaron que el fenómeno podría reescribir su comprensión de la superconductividad y, quizás, incluso conducir al diseño de materiales capaces de exhibir el fenómeno a temperaturas mucho más elevadas.

Sin embargo, puede que toda la atención prestada a ese pequeño giro entre las láminas de grafeno haya sido engañosa. En un trabajo reciente, un equipo de físicos ha referido la emergencia de superconductividad en tres capas de grafeno sin ningún giro relativo entre ellas. El descubrimiento, liderado por Andrea Young y Haoxin Zhou, de la Universidad de California en Santa Bárbara, podría obligar a reconsiderar el debate sobre la naturaleza de la superconductividad en el grafeno, ya que ahora algunos investigadores creen que podría ser ordinaria.

«Es un hallazgo muy importante que muestra que la superconductividad [en el grafeno] es, en cierto sentido, normal», apunta Sankar Das Sarma, físico teórico de la materia condensada de la Universidad de Maryland que no participó en la investigación.

Con todo, los indicios que apuntan a una superconductividad ordinaria tampoco son concluyentes. Y algunos investigadores señalan que, aunque la superconductividad del grafeno tricapa sea normal, ello no impediría que la del grafeno bicapa rotado fuese exótica.

Rompecabezas teórico

Albert Einstein, Richard Feynman y Werner Heisenberg son solo algunos de los gigantes de la física del siglo xx que fracasaron en su intento de comprender por qué muchos metales comienzan a conducir la electricidad sin resistencia cuando se enfrían a muy bajas temperaturas. En 1957, casi medio siglo después de que se descubriera la superconductividad ordinaria, John Bardeen, Leon Cooper y John Robert Schrieffer consiguieron explicar el fenómeno, un logro que les valió el premio Nobel de física.

Estos investigadores hallaron que, en un metal, la propagación de fonones (excitaciones asociadas a la propagación de ondas acústicas, las cuales provocan pequeñas alteraciones en la disposición de los átomos) tiende a crear concentraciones de carga positiva. Dichas concentraciones atraen los electrones y hacen que estos formen parejas, conocidas como «pares de Cooper». Sin embargo, los pares de Cooper exhiben un comportamiento cuántico muy distinto del de los electrones individuales: pueden formar un fluido cuántico que avanza por el material sin verse obstruido por los átomos de la red. Esta teoría de la superconductividad, en la que las interacciones electrónicas están mediadas por fonones, se conoce como «teoría BCS» en honor a sus autores y concuerda con los resultados de casi todos los experimentos de superconductividad.

No obstante, se conocen formas alternativas de «pegar» electrones, al menos en teoría. Y aunque no son concluyentes, ya se han observado indicios experimentales de tales mecanismos exóticos en algunos superconductores. No obstante, «es como si alguien te dijera que en un pueblo de una isla muy lejana hay gente con tres cabezas», advierte Das Sarma. «Tendríamos que ser muy escépticos.»

En 2018 algunos investigadores pensaron que podían haber dado con esa mítica isla de superconductividad exótica, ya que los electrones del grafeno bicapa girado parecían estar mucho más firmemente unidos que los de los superconductores ordinarios. El interés aumentó a principios de este año, cuando se publicaron dos artículos que anunciaron la emergencia de superconductividad en un sistema similar: tres capas de grafeno giradas con

su propio ángulo. Ambas disposiciones compartían una rara simetría rotacional de 180 grados, que, según los teóricos, podría sustentar una forma particularmente exótica de superconductividad basada en ciertos vórtices de electrones conocidos como «skyrmiones».

Grafeno ABC

No obstante, la nueva encarnación del grafeno superconductor parece sorprendentemente sencilla. El «grafeno tricapa ABC», como lo han bautizado Young y sus colaboradores, es uno de los materiales más limpios y sencillos que han podido fabricar. La segunda y la tercera capa no están giradas, sino desplazadas por el equivalente a media celda hexagonal (la celda unitaria del grafeno). De esta manera, los átomos de carbono de la capa inferior caen en el centro de las celdas de la capa superior.

Apilar hojas de grafeno no resulta sencillo, haya o no un giro relativo entre ellas. Los sistemas con capas rotadas están plagados de arrugas que alteran el llamado «ángulo mágico» en diferentes zonas, lo que hace que cada disposición sea única. Cuando Young y sus colaboradores fabricaron sus dispositivos tricapa ABC, la mayoría de los intentos dieron como resultado patrones de alineamiento distintos. Pero, a diferencia de las disposiciones rotadas, aquellas que sí adoptaron la colocación correcta eran todas idénticas entre sí, desde el primer átomo hasta el último. Los átomos quedan «encajados en su sitio como si fueran piezas de Lego», explica Young.

Una vez que los investigadores obtuvieron su primer dispositivo ABC, usaron un campo eléctrico ajustable para mezclar electrones entre las capas. Al variar la distribución de electrones a temperaturas criogénicas, vieron que el sistema se comportaba de forma muy parecida al grafeno girado, saltando entre varios tipos de comportamiento magnético tal y como indicaron los cambios en la forma en que el dispositivo frenaba la corriente eléctrica. Los autores dieron a conocer sus resultados en una prepublicación aparecida el pasado mes de abril.

Al examinar las transiciones con más detalle, identificaron breves parpadeos de resistencia eléctrica nula cuando el material se encontraba una décima de grado por encima del cero absoluto. Y aunque no tenían forma de observar directamente los pares de Cooper, hallaron un comportamiento que Bardeen, Cooper y Schrieffer habrían sabido reconocer.

Mover los electrones entre las tres capas aumentaba el número de configuraciones posibles de las partículas, una cantidad conocida como «densidad de estados del sistema». Y con densidades de estado elevadas, los electrones pueden confraternizar más fácilmente entre sí. La teoría BCS predice que esa libertad electrónica favorece la formación de pares de Cooper. Y eso es precisamente lo que vieron los investigadores: cuando la densidad de estados aumentó, el material mostró dos breves episodios de superconductividad.

Dado que las propiedades de la teoría BCS parecen respetarse, los causantes de la superconductividad en el grafeno podrían ser los fonones ordinarios. «Grazna como un pato y camina como un pato», ejemplifica Das Sarma. «Es natural suponer que los responsables son los fonones.»

Mecanismo incierto

Otros investigadores no están tan convencidos, ya que creen que las pruebas que apuntan a los fonones en el grafeno ABC siguen siendo escasas. Es cierto que la superconductividad parece aumentar con la densidad de estados, pero eso no significa necesariamente que se acomode por completo a la teoría BCS, aduce Mike Zaletel, físico de la materia condensada de la Universidad de California en Berkeley. Zaletel discutió con Young durante la investigación y ha contribuido a desarrollar la teoría de la superconductividad basada en skyrmiones.

En los datos del equipo de Young, Zaletel ve indicios de un tipo de superconductividad ligeramente exótica: algo así como una isla con habitantes con seis dedos, en lugar de con personas con tres cabezas. El físico explica que los dos breves episodios de superconductividad aparecieron justo antes de que los electrones se organizaran en estados ferromagnéticos, con sus estados de espín alineados. Y cuando las regiones del material empiezan a alinearse, esas zonas homogéneas fluctuantes bien podrían haber inducido la formación de pares de Cooper, tal y como en la superconductividad ordinaria hacen los fonones.

El grupo de Young ya está intentando comprobar si el ferromagnetismo es clave para la aparición de la superconductividad en el grafeno tricapa ABC. Si, por el contrario, resultara ser irrelevante, ello apuntaría a un mecanismo ordinario basado en fonones.

Muchos físicos ven con optimismo el sistema analizado por el grupo de Young, pues esperan que les ayude a averiguar cómo emerge la superconductividad en el grafeno. Hasta ahora, la idiosincrasia de cada dispositivo de grafeno rotado hacía imposible que incluso un mismo laboratorio pudiera replicar por completo sus propios resultados. El grafeno tricapa ABC, con su disposición perfecta, permite superar esa dificultad.

«Los materiales son complicados y siempre encuentran una forma de mentirnos», dice Steven Kivelson, físico teórico de Stanford. Lo emocionante de este hallazgo es que promete facilitar materiales reproducibles, «para que todo el mundo pueda obtener la misma respuesta», añade el investigador.

Dado que el grafeno ABC puede convertirse en un superconductor y en varios tipos de imanes sin giros ni trucos obvios, el fenómeno sugiere que también otros materiales relativamente simples podrían exhibir una magia hasta ahora inadvertida. Esa versatilidad «puede estar escondida delante de nosotros en una forma mucho más ubicua de lo que pensábamos», concluye Young.

Charlie Woods *es periodista científico especializado en física. Ha publicado en* Scientific American*,* The Christian Science Monitor *y* LiveScience*, entre otros medios, y es redactor colaborador de* Quanta Magazine.

Este artículo apareció originalmente en QuantaMagazine.org, una publicación independiente promovida por la Fundación Simons para potenciar la comprensión pública de la ciencia



PARA SABER MÁS

Superconductivity in rhombohedral trilayer graphene. Haoxin Zhou et al. en arXiv:2106.07640, 14 de junio de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Electrónica del grafeno. J. González Carmona, Francisco Guinea y M. A. H. Vozmediano en *IyC*, septiembre de 2010.

Viaje a un universo de dos dimensiones. José J. Baldoví y Ángel Rubio en *IyC*, septiembre de 2018.

Superconductividad en el grafeno. Elizabeth Gibney en *IyC*, mayo de 2019.

Nuevos estados en el grafeno «mágico». Dmitri K. Efetov en *IyC*, octubre de 2020.

FISIOLOGÍA

¿Cómo se pliega y mueve la pared del intestino?

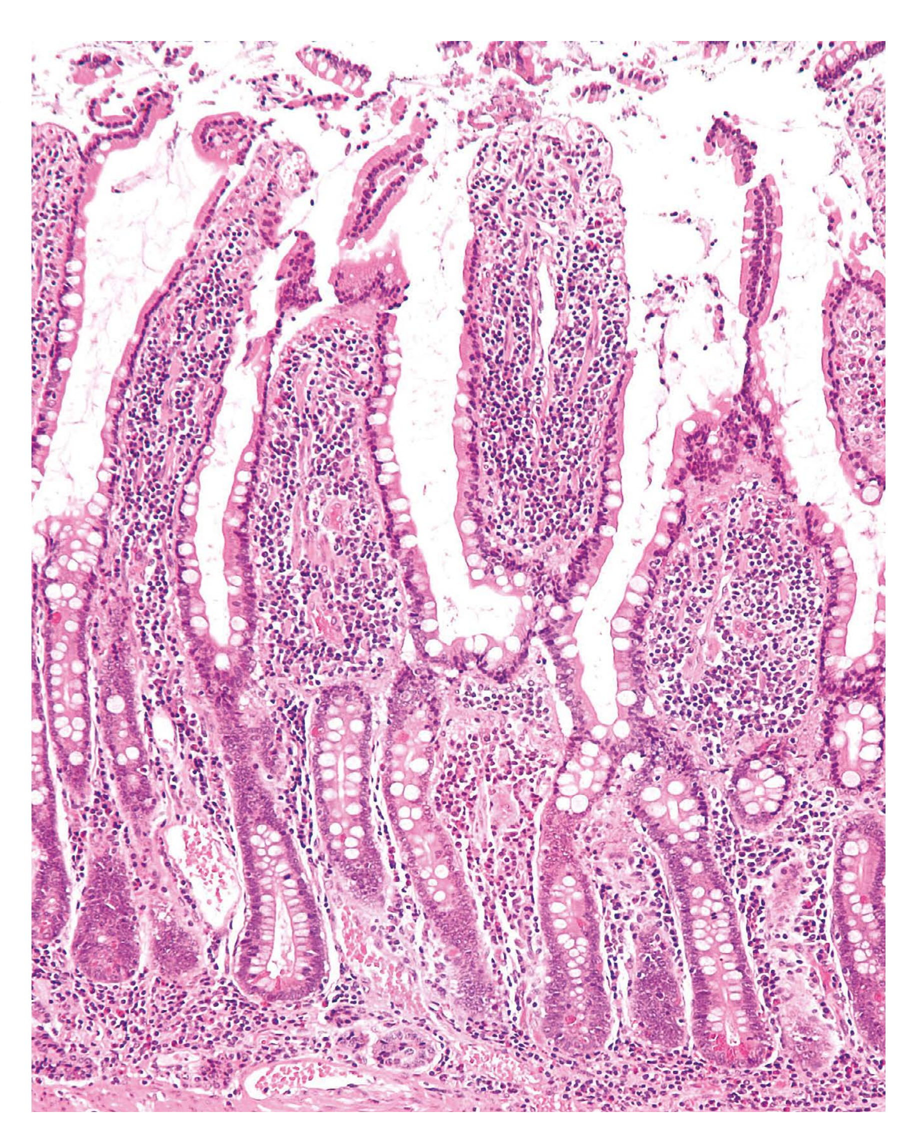
Los resultados de un estudio contradicen la hipótesis aceptada hasta la fecha

MARTA PULIDO SALGADO

Todo empezó cuando Xavier Trepat, investigador del Instituto de Bioingeniería de Cataluña (IBEC), y su equipo cultivaron organoides del intestino sobre un sustrato llano y blando. Para su sorpresa, los agregados celulares se estiraron y formaron un tejido con estructuras parecidas a las criptas y vellosidades del órgano real. Ello llevó a los investigadores a preguntarse: ¿cómo se pliega el tejido intestinal? ¿Cómo se mueven las células para renovar el tejido?

«Para resolver dichas incógnitas, nos embarcamos en una aventura que duró cuatro años», explica a *Investigación y Ciencia* Gerardo Ceada, coautor del estudio publicado en tiempo reciente por la revista *Nature Cell Biology*.

En el tejido intestinal, el recambio celular ocurre de forma constante, pues cada 3 o 5 días la pared del intestino se renueva por completo. «Sin embargo, en las enfermedades inflamatorias o el cáncer este proceso se altera y no sabemos por qué. Para identificar la pieza que falla, primero debemos conocer el modo en que las fuerzas celulares se generan y controlan el plegamiento intestinal o el movimiento de las células que permite renovar el tejido. Es parecido a entender cómo funciona el engranaje que mueve las agujas de un reloj para poder arreglarlo cuando se estropea», comenta el investigador.



WIKIMEDIA COMMONS

Micrografía de la mucosa intestinal. Se observan los característicos pliegues, así como las vellosidades (cimas) y las criptas (valles).

A diferencia de otros modelos experimentales tradicionales in vitro, como los cultivos celulares en dos dimensiones, los conjuntos de células tridimensionales, llamados organoides o miniórganos, reproducen múltiples características del tejido real. Mediante el uso de organoides intestinales de ratón, Ceada y sus colaboradores observaron que las células que conforman las criptas intestinales soportan una mayor tensión en la parte superior que en la parte inferior. Ello explicaría la característica forma tubular de dichas invaginaciones del epitelio, que protegen a las células madre de patógenos y agentes externos. Estas dan origen a las nuevas células que migran hacia la cima de las vellosidades para renovar el tejido.

«Este resultado, no obstante, contradice la hipótesis más aceptada en la actualidad. Hasta la fecha se postulaba que las células generadas en la cripta empujaban a sus vecinas para salir y llegar a la cima de las vellosidades. Ello provocaría que las células de la cripta se hallaran bajo compresión, pero los datos demuestran que, en verdad, experimentan tensión», expone Ceada. «Dicho de otro modo, al parecer, son las células de las vellosidades las que tiran de las nuevas células, a fin de sacarlas de la cripta.»

Las fuerzas responsables de este movimiento se identificaron gracias a mapas tridimensionales de los organoides, generados mediante técnicas de microscopía de alta resolución. «Los miniórganos nos per-

miten estudiar los procesos que ocurren en el tejido real de forma bastante fidedigna. Sin embargo, no reproducen toda su complejidad, ni las interacciones con el sistema vascular o el sistema inmunitario, por ejemplo. Aun así, tanto los organoides como el intestino real presentan la misma maquinaria que permite a las células contraerse», declara el investigador.

«Este trabajo ha aportado respuestas importantes, pero también ha abierto nuevos interrogantes. En un futuro, centraremos nuestros esfuerzos en dilucidar el modo en que el tejido se compartimenta en criptas y vellosidades. Asimismo, también estudiaremos la fusión y separación de los nichos de células madre», concluye Ceada.

Marta Pulido Salgado, doctora en biomedicina por la Universidad de Barcelona y máster en comunicación científica por la Universidad Pompeu Fabra, escribe sobre biomedicina.

PARA SABER MÁS

Mechanical compartmentalization of the intestinal organoid enables crypt folding and collective cell migration. C. Pérez-González et al., en *Nature Cell Biology*, publicado el 21 de junio de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Organoides: los constructores del cuerpo. Michael Eisenstein en *IyC*, abril de 2018.
Obtienen pequeños intestinos funcionales y parecidos al órgano real. Marta Pulido Salgado en *Especial Organoides*, enero de 2021.

FÍSICA DE PARTÍCULAS

El LHC descubre una partícula exótica formada por cuatro quarks

El nuevo tetraquark parece ser cualitativamente distinto de los hallados hasta ahora. El hito podría ayudar a los físicos a poner a prueba la teoría de la interacción nuclear fuerte

DAVIDE CASTELVECCHI

El Gran Colisionador de Hadrones (LHC) es también es un gran descubridor de hadrones. El acelerador situado en las inmediaciones de Ginebra es célebre por haber descubierto en 2012 el bosón de Higgs, la última pieza que faltaba por encontrar en la clasificación vigente de las partículas elementales. Sin embargo, el LHC también ha descubierto decenas de hadrones: partículas no elementales que, como los protones y los neutrones, están formadas por quarks.

El último de estos hadrones fue presentado este verano en una conferencia virtual de la Sociedad Europea de Física. En una charla impartida el 29 de julio, Ivan Polyakov, físico de partículas de la Universidad de Siracusa, hizo público el hallazgo de un hadrón exótico formado por cuatro quarks. Según el minucioso censo que mantiene Patrick Koppenburg, físico de partículas del Instituto Nacional de Física Subatómica de los Países Bajos, el hito eleva a 62 el número de hadrones descubiertos por el LHC. «Todos ellos son primicias mundiales», afirma Koppenburg, quien también trabaja en el CERN, el laboratorio europeo de física de partículas que alberga el LHC.

El modelo estándar de la física de partículas describe los componentes básicos de la materia y las interacciones que median entre ellos. Incluye seis tipos de quarks y sus correspondientes homólogos de antimateria, así como otras partículas elementales, como electrones y fotones. La teoría también incorpora las reglas que dictan la manera en que los quarks pueden combinarse entre sí para dar lugar a hadrones. En estos, los quarks se mantienen unidos gracias a la interacción nuclear fuerte, una de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza. Los dos tipos de quarks más comunes en la naturaleza son los denominados *arriba* (*up*) y *abajo* (*down*). Sus posibles combinaciones incluyen el protón (formado por dos quarks *arriba* y uno *abajo*) y el neutrón (dos quarks *abajo* y uno *arriba*).

Los protones son los únicos hadrones conocidos que son estables cuando se encuentran aislados (los neutrones solo lo son cuando forman parte de un núcleo atómico, pero aislados se desintegran en unos 15 minutos). Todos los demás hadrones se forman fugazmente en colisiones de partículas de alta energía y se desintegran después en brevísimas fracciones de segundo. En el LHC, los hadrones se crean al hacer colisionar protones a velocidades muy próximas a la de la luz.

Un genuino cuarteto de quarks

La mayoría de los nuevos hadrones descubiertos en el LHC han sido identificados por el experimento LHCb, uno de los cuatro gigantescos detectores que jalonan el anillo circular que alberga el LHC, de 27 kilómetros de longitud. La partícula anunciada ahora no ha sido una excepción. Al examinar los datos del detector LHCb, Polyakov y Vanya Belyaev, del Instituto de Física Teórica y Experimental de Moscú, identificaron claramente la huella de un tetraquark (el nombre que reciben los hadrones formados por cuatro quarks) denominado T_{cc}^{+}.

Los tetraquarks son muy inusuales, ya que la mayoría de los hadrones conocidos están formados por dos o por tres quarks. Los indicios del primer tetraquark fueron hallados en 2003 en el experimento Belle, de la Organización para la Investigación en Física de Altas Energías con Aceleradores (KEK) de Japón. Por su parte, el detector LHCb ha encontrado varios más desde su puesta en marcha.

No obstante, el tetraquark descubierto ahora parece ser especial. Los identificados con anterioridad probablemente puedan interpretarse como uniones de dos parejas ordinarias de quarks, de manera similar a como dos átomos pueden unirse para formar una molécula. Pero, según explica Marek Karliner, físico teórico de la Universidad de Tel Aviv, este último parece ser un genuino estado ligado de cuatro quarks: «Es muy importante. Se trata de una nueva bestia, no de una molécula hadrónica. Es el primero de su clase». En 2017, un trabajo de Karliner



IMÁN DIPOLAR del experimento LHCb, uno de los cuatro detectores del Gran Colisionador de Hadrones del CERN.

PETER GINTER/CERN

predijo la existencia de una partícula con las mismas propiedades que T_{cc}^{+}.

Belyaev explica que, en la naturaleza, los tetraquarks probablemente solo existieron durante los primeros instantes del universo, cuando la temperatura y la densidad de materia y energía alcanzaron valores extremos. Pero crearlos de nuevo es importante, ya que ello permite a los físicos poner a prueba la compleja teoría que describe las interacciones nucleares fuertes.

Los datos analizados ahora han revelado las propiedades de la nueva partícula con tanta precisión que, en un principio, Belyaev se quedó atónito. «Mi primera reacción fue pensar que se trataba de un error mío», rememora. Por ejemplo, la masa de la partícula (unas cuatro veces la del protón), fue determinada con un margen de error unas 3000 veces menor que en el descubrimiento del bosón de Higgs. Belyaev añade que, en realidad, el hadrón T_{cc}^{+} podía haberse identificado en los datos procedentes de los primeros años de operaciones del LHC. Sin embargo, ni él ni sus colegas de profesión lo habían encontrado hasta ahora debido a la larga lista de posibles partículas que debían examinar.

Una miríada de hadrones aún por descubrir

La búsqueda de nuevos hadrones continuará, ya que las combinaciones posibles de quarks se cuentan por decenas. Con respecto a las múltiples posibilidades predichas por la teoría que aún esperan verse confirmadas por el experimento, Karliner afirma: «Estamos seguros de que existen, pero resultan difíciles de crear».

Además, para una combinación de quarks dada, existe un gran número de estados excitados más masivos y con distintos números cuánticos, los cuales se clasifican como partículas independientes. Muchos de ellos se han encontrado ya en los experimentos y, de hecho, la mayoría de los hadrones listados en el catálogo de Koppenburg corresponden a estados excitados. «Quién sabe cuántos más están escondidos entre los datos de algún ordenador portátil», añade Koppenburg, quien, al igual que Polyakov y Belyaev, es miembro de la colaboración LHCb.

El físico también se pregunta si todos estos hallazgos deberían ser tratados como genuinas partículas individuales. «Cada vez estoy más convencido de que necesitamos una mejor definición de qué es una partícula», concluye.

Davide Castelvecchi *es periodista científico especializado en física, astronomía y matemáticas de la revista* Nature.

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 596, pág. 330, agosto de 2021. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2021

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Discovery of the doubly charmed Ξ_{cc} baryon implies a stable $bb\bar{u}\bar{d}$ tetraquark. Marek Karliner y Jonathan L. Rosner en *Physical Review Letters*, vol. 119, art. 202001, noviembre de 2017.

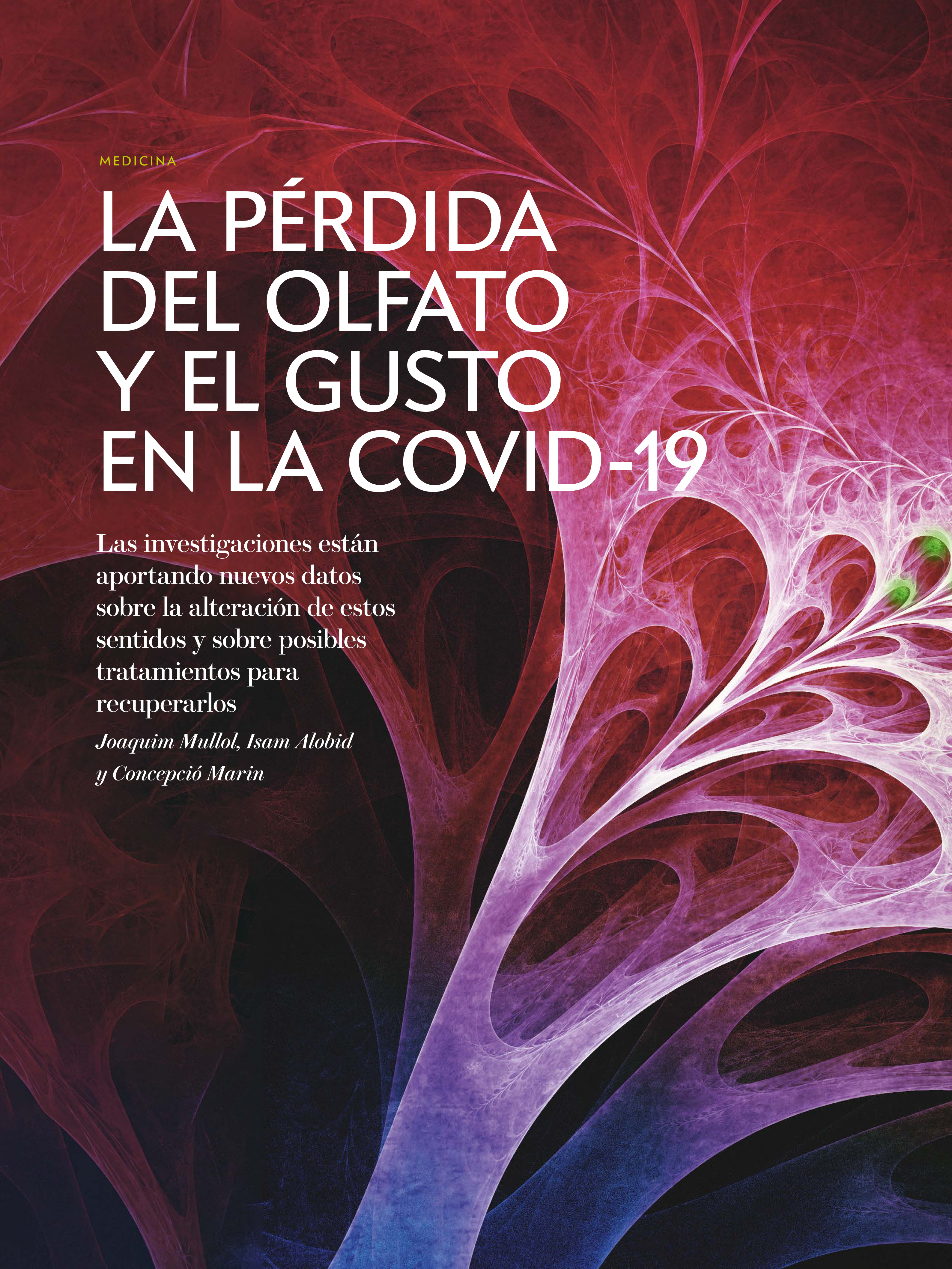
Observation of an exotic narrow doubly charmed tetraquark. Colaboración LHCb en arXiv:2109.01038, 2 de septiembre de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Las enigmáticas propiedades de los gluones. Rolf Ent, Thomas Ullrich y Raju Venugopalan en *IyC*, julio de 2015.

Medir la belleza. Guy Wilkinson en *IyC*, enero de 2018.

El último secreto del átomo. Abhay Deshpande y Rikutaro Yoshida en *IyC*, agosto de 2019.

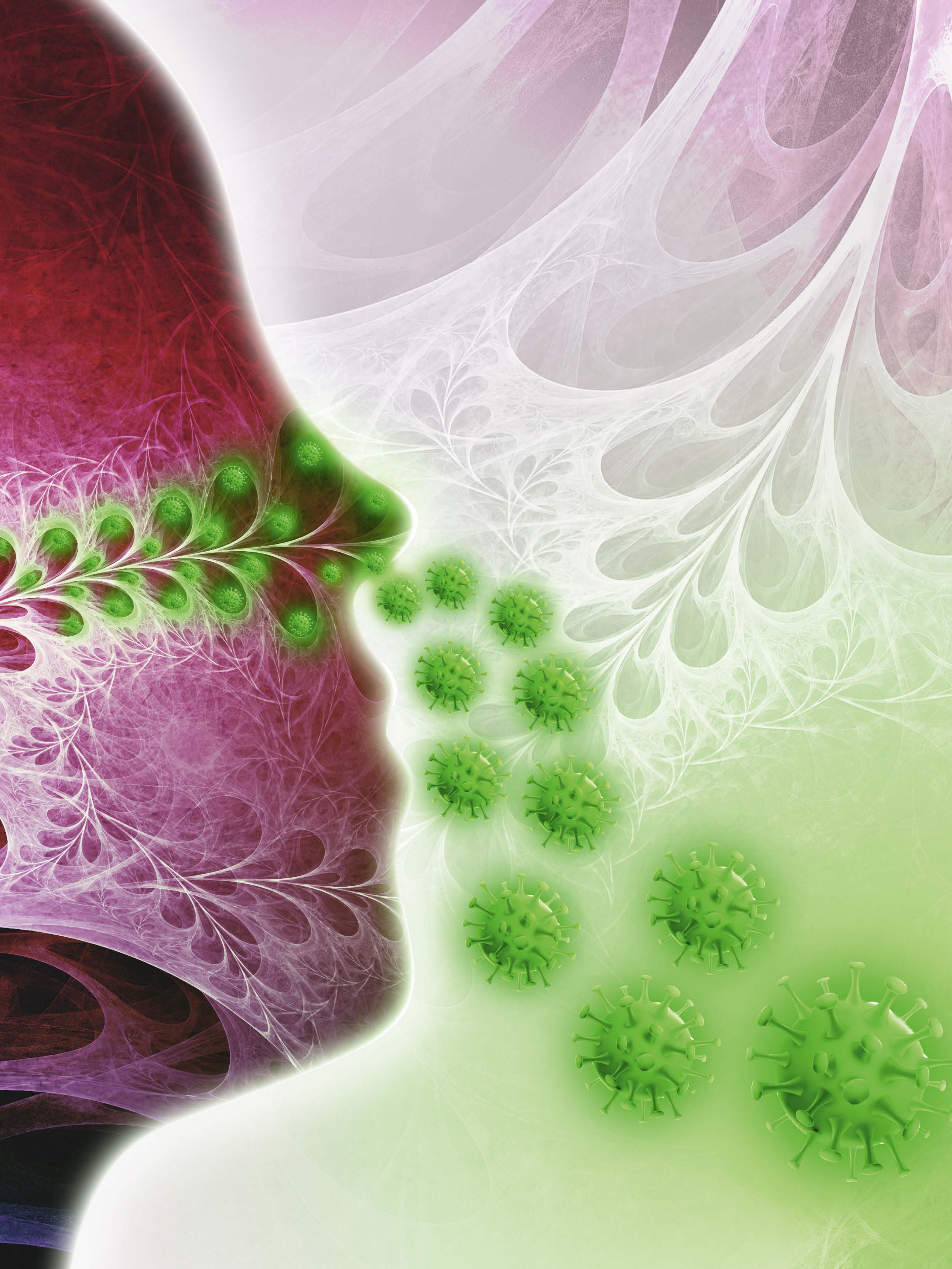


MEDICINA

LA PÉRDIDA DEL OLFATO Y EL GUSTO EN LA COVID-19

Las investigaciones están aportando nuevos datos sobre la alteración de estos sentidos y sobre posibles tratamientos para recuperarlos

Joaquim Mullol, Isam Alobid y Concepció Marin



Joaquim Mullol es otorrinolaringólogo de la Unidad de Rinología y Clínica del Olfato en el Hospital Clínico de Barcelona (HCB) e investigador del Instituto de Investigaciones Biomédicas August Pi i Sunyer (IDIBAPS). Sus principales líneas de investigación son los mecanismos de la inflamación nasosinusal y el sentido del olfato en la salud y la enfermedad.

Isam Alobid, otorrinolaringólogo de la Unidad Multidiciplinar de Cirugía de Base de Cráneo del HBC e investigador del IDIBAPS, se interesa por las técnicas quirúrgicas en la base del cráneo para el estudio del olfato y sus alteraciones.

Concepció Marin, bióloga y neuróloga, investiga en el IDIBAPS los mecanismos de las enfermedades neurodegenerativas y el sentido del olfato en la salud y la enfermedad.



L OLFATO Y EL GUSTO DESEMPEÑAN UN PAPEL IMPORTANTE EN NUESTRA VIDA diaria. Nos ayudan a identificar y seleccionar los alimentos, influyen en la cantidad y composición de los nutrientes que ingerimos y contribuyen a la detección de sustancias putrefactas y potencialmente tóxicas. Además, intervienen en el disfrute de los alimentos y los aromas, en las relaciones interpersonales y en la calidad de vida en general.

A pesar de su relevancia, la alteración de estos sentidos ha recibido tradicionalmente una atención insuficiente por parte de la comunidad médica y científica, quizá porque se han considerado trastornos con efectos poco importantes o por la ausencia de tratamientos. Sin embargo, cada vez hay más pruebas de que estas disfunciones afectan la calidad de vida y deterioran la salud al provocar ansiedad, alteraciones alimentarias y de peso, y depresión. Además, los trastornos del olfato se han relacionado con algunas enfermedades neurodegenerativas, como el párkinson.

Si bien cada vez se reconoce más la importancia de las disfunciones olfativas y gustativas, su verdadera frecuencia en la población general no está clara. Ello se debe a que las estimaciones varían notablemente según la población analizada, el modo de definir las disfunciones y la técnica de evaluación utilizada. Aun así, se calcula que, de forma global, la pérdida del olfato afecta a una de cada cinco personas, siendo total (anosmia) en una de cada 300.

En el contexto de la epidemia mundial de COVID-19, los trastornos del olfato y el gusto han atraído la atención de la población y de los especialistas sanitarios, por la difusión que han hecho los medios de comunicación y por el aumento del número de estudios que destacan la relevancia de esos síntomas en la enfermedad. Incluso algunos investigadores han propuesto que la pérdida repentina, grave y aislada del olfato o del gusto, en ausencia de otros síntomas y de otras enfermedades, debería alertar a las personas y al personal sanitario sobre una posible infección por coronavirus, o utilizarse como una herramienta para diagnosticar la enfermedad.

A continuación, analizaremos los datos disponibles sobre la frecuencia de la pérdida del olfato y el gusto, tanto en la población general como en los pacientes de COVID-19, los mecanismos neurobiológicos que sustentan estos síntomas y las estrategias terapéuticas disponibles para recuperar dichos sentidos.

¿CÓMO PERCIBIMOS LOS OLORES Y LOS SABORES?

Las sustancias odorantes llegan, a través del aire inspirado, a la parte superior de las cavidades nasales, donde existe una hendidura o surco que alberga el epitelio olfativo, también conocido

EN SÍNTESIS

La pérdida del olfato y el gusto es frecuente en la COVID-19: entre el 60 y 70 por ciento de los pacientes la sufren, y en un 20 por ciento se presenta como un síntoma repentino, grave y de forma aislada.

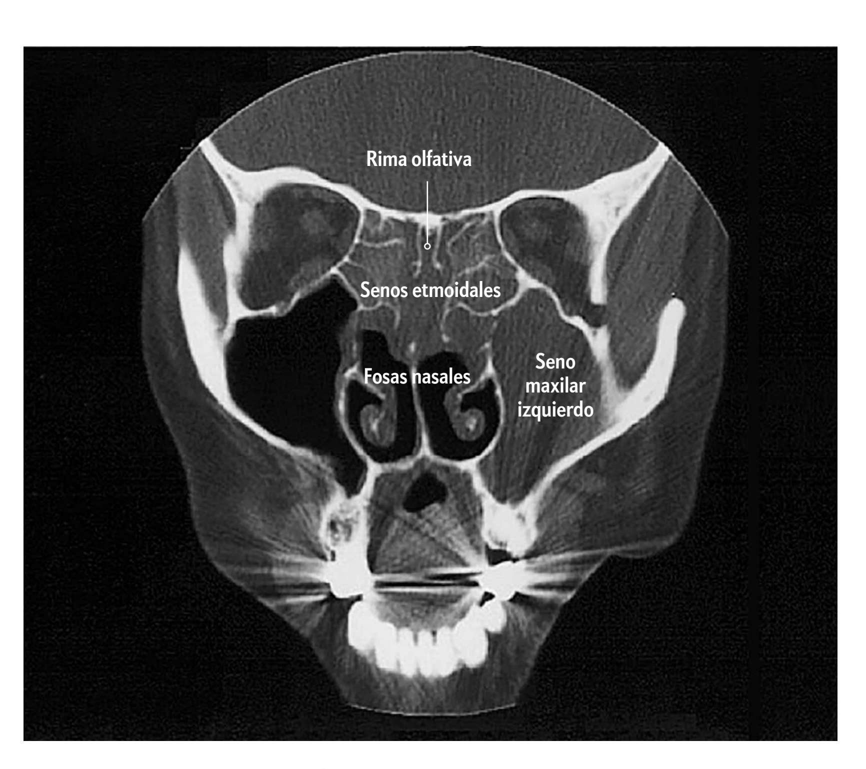
El SARS-CoV-2 altera estos sentidos al provocar la destrucción y neurodegeneración de las mucosas olfativa y gustativa, que albergan las neuronas sensoriales que captan los olores y los sabores.

A falta de fármacos eficaces, el entrenamiento olfativo es la única terapia validada para restaurar la pérdida del olfato por COVID-19, y se debe iniciar lo antes posible.

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES/DANYLANA/ISTOCK

como mucosa olfativa. Este tejido nervioso, que ocupa una superficie de entre 8 y 10 centímetros cuadrados, aloja entre 5 y 30 millones de neuronas receptoras, las responsables de captar y transmitir al sistema nervioso las señales olfativas. En concreto, las moléculas olorosas activan dichas neuronas al unirse a unas proteínas receptoras situadas en su membrana plasmática. La activación de las neuronas se traduce en señales que llegan al bulbo olfativo, otro tejido que integra dicha información y la comparte con distintas estructuras del sistema nervioso central. Esta alcanza primero los centros de la memoria (hipotálamo) y de la alarma inmediata (sistema límbico), y desde ellos llega por último a la corteza cerebral, donde se adquiere la consciencia de la percepción olfativa.

Por otro lado, en el sentido del gusto intervienen las papilas gustativas de la lengua y el paladar. En ellas se alojan neuronas dotadas con cinco tipos de proteínas receptoras, que son las responsables de percibir los sabores dulce, salado, amargo, ácido y umami. De modo semejante a como sucede con el olfato, las señales generadas por estas neuronas se vehiculizan a través de otras estructuras nerviosas antes de alcanzar el cerebro.



ESTA IMAGEN DE TOMOGRAFÍA del cráneo es característica de los pacientes con rinosinusitis crónica y poliposis nasal, enfermedades que provocan una pérdida importante del olfato. Ello se debe en gran parte a que los senos paranasales (sobre todo el seno maxilar izquierdo, los senos etmoidales, la parte superior de las fosas nasales y la rima olfativa) están ocupados por tejido inflamatorio.

CORTESÍA DE LOS AUTORES

Cuando falla alguna de las partes de estos refinados mecanismos, se produce una pérdida parcial o total del olfato y del gusto. Las disfunciones olfativa y gustativa tienen un impacto importante en la calidad de vida de las personas, ya que pueden ser, además, responsables de accidentes por gas doméstico, intoxicación alimentaria, disminución del apetito y desnutrición (principalmente en ancianos), reducción de la inmunidad y empeoramiento de otras enfermedades ya presentes.

¿Cuán frecuente es la alteración del olfato y el gusto, y a quién afecta? A diferencia de otros sentidos, las capacidades olfativa y gustativa, así como su pérdida, resultan difíciles de medir, como veremos más adelante. Sin embargo, algunos estudios epidemiológicos han aportado datos valiosos sobre la frecuencia de estas disfunciones en la población general. El estudio OLFACAT, liderado por nuestro grupo y realizado en la población de Cataluña, demostró una prevalencia de pérdida parcial (hiposmia) o total (anosmia) del olfato en el 19 por ciento de la población general. Otros trabajos recientes llevados a cabo en Estados Unidos y en México han revelado, asimismo, prevalencias importantes de pérdida de olfato, del 14 y del 7 por ciento, respectivamente, en cada país.

En todos estos trabajos se han identificado algunos de los factores de riesgo de dichas disfunciones: pertenecer al sexo masculino, tener una edad avanzada o antecedentes de traumatismo craneoencefálico y padecer enfermedades neurodegenerativas, diabetes u obesidad, así como tener un bajo nivel económico o educativo, aumentan la probabilidad de sufrir una alteración del olfato.

¿POR QUÉ PERDEMOS EL OLFATO?

La principal causa de la disfunción olfativa son las infecciones nasales por virus respiratorios, entre ellos los adenovirus, los rinovirus, los coronavirus y los virus de la gripe. En el resfriado común y la gripe, la disminución de la capacidad olfativa es un síntoma común (se produce en el 60 por ciento de los casos) y generalmente transitorio (dura entre 3 y 15 días). De hecho, estas dos enfermedades son la causa más frecuente de la pérdida persistente de olfato. En cambio, la frecuencia con la que provocan una disminución o alteración del gusto (disgeusia) es mucho menor.

Además de las infecciones víricas nasales, también provocan disfunciones olfativas las lesiones por un traumatismo cerebral agudo, la inflamación crónica de las vías respiratorias superiores (rinitis alérgica, rinosinusitis crónica, asma) y las enfermedades neurodegenerativas, como el párkinson o el alzhéimer.

Nuestro grupo de investigación ha corroborado varios de estos efectos. En estudios previos identificamos una pérdida del olfato entre leve y moderada en los pacientes con rinitis alérgica, tanto niños como adultos, y entre moderada y grave en aquellos con ciertas enfermedades congénitas (síndrome de Kallmann y de Turner), infecciones víricas nasales y rinosinusitis crónica con pólipos nasales. En un trabajo reciente hemos comprobado, además, que, en las personas mayores de 50 años, la pérdida del olfato grave y de origen desconocido puede representar un factor de riesgo de padecer párkinson. Es decir, la aparición de este síntoma, sin causa conocida, puede indicar una mayor predisposición de sufrir la enfermedad en el futuro.

Otras causas menos frecuentes de la pérdida de olfato son los tumores, los fármacos, la exposición a sustancias tóxicas, la irradiación o el daño derivado de una intervención quirúrgica.

Pero ¿cuáles son los mecanismos fisiopatológicos que subyacen a la disfunción olfativa? Según cuál sea la causa de esta, puede haber uno o una combinación de varios mecanismos,

que van desde la obstrucción mecánica del aire inspirado hasta la inflamación de la mucosa olfativa o la neurodegeneración de diferentes estructuras olfativas, tanto nasales como intracerebrales.

En las causas congénitas existe un déficit en el desarrollo de las estructuras olfativas intracerebrales. En las infecciones víricas, como el resfriado común, la afectación de la mucosa olfativa, y potencialmente de los bulbos olfativos, pueden provocar una inflamación aguda y una degeneración de las neuronas sensoriales olfativas. La inflamación crónica de las fosas nasales y los senos paranasales, como la que se da en la rinitis alérgica o en la rinosinusitis crónica, puede inducir un efecto combinado de obstrucción de la entrada de aire (y, por tanto, de los olores) y de inflamación localizada de la mucosa olfativa. En las enfermedades neurodegenerativas, como el párkinson, se ha descubierto que se producen acumulaciones de proteínas anómalas en las estructuras nerviosas olfativas, predominantemente en los bulbos olfativos. El traumatismo cerebral agudo puede provocar tanto una sección de las fibras nerviosas que conectan la mucosa olfativa con los bulbos olfativos como una destrucción o neurodegeneración de las estructuras olfativas intracerebrales.

A pesar de los avances logrados, los mecanismos fisiopatológicos y neurobiológicos de la pérdida del olfato están todavía pobremente descritos, lo que pone de relieve la clara necesidad de investigar con mayor profundidad en este campo.

¿QUÉ SUCEDE EN LA COVID-19?

La enfermedad está causada por el virus SARS-CoV-2, cuyo genoma fue caracterizado en enero de 2020, poco después de que irrumpiera en el mundo.

La prevalencia de la pérdida del olfato en la COVID-19 parece ser superior a la del gusto. La segunda suele recuperarse antes, pero se asocia a una mayor gravedad de la enfermedad

Los síntomas comunes de la COVID-19 son malestar general, fiebre, tos, dificultad para respirar, dolor muscular y articular, dolor de garganta y de cabeza, náuseas o vómitos, diarrea y, con gran frecuencia, pérdida o distorsión del olfato y el gusto. Sin embargo, a diferencia de otras infecciones víricas que atañen a la nariz (resfriado común, gripe), la pérdida del olfato y del gusto en la COVID-19 se presenta frecuentemente de forma súbita, grave (anosmia) y, a menudo, como síntoma único o aislado de otros síntomas nasales o generales.

Los estudios realizados durante la pandemia han demostrado una alta prevalencia de los trastornos del olfato y del gusto en los pacientes de COVID-19: entre el 60 y el 70 por ciento de ellos los presentan. Pero también se ha observado una alta variabilidad en ese porcentaje, con valores de prevalencia de entre el 5 y el 95 por ciento dependiendo del país, el diseño del estudio y el tipo de medición empleados. Algunos estudios iniciales apuntan a que las poblaciones con dietas ricas en especias, verduras fermentadas, col o brócoli sufren un menor impacto de estos síntomas.

Gracias a los rápidos avances en la investigación y la descripción del nuevo coronavirus, pronto se identificó que la «puerta» principal que utilizaba para introducirse en las células era cierto receptor de la membrana plasmática, una proteína denominada enzima convertidora de angiotensina 2 (ACE2). Este receptor se halla presente en múltiples órganos humanos, incluidos el sistema nervioso central y el neuroepitelio olfativo. Otro receptor de membrana que también emplea el virus es la proteasa transmembrana serina 2 (TMPRSS2).

En el neuroepitelio olfativo, las neuronas sensoriales carecen de dichos receptores, ACE2 y TMPRSS2. En cambio, sí los presentan las células sustentaculares, un tipo particular de células que ofrecen soporte a las neuronas del neuroepitelio. Los receptores de las células sustentaculares facilitan la unión del virus a su membrana, la entrada en la célula y la replicación vírica en su interior. Como consecuencia de la destrucción de estas células, se produce una inflamación local, la degeneración del neuroepitelio y la pérdida del olfato.

El mecanismo de la pérdida del gusto es muy parecido y afecta a las células sustentaculares de la mucosa gustativa.

¿CÓMO SE MIDE LA PÉRDIDA DEL OLFATO Y EL GUSTO?

Existen numerosas técnicas y herramientas para explorar la capacidad olfativa y gustativa, denominadas, respectivamente, olfatometría y gustometría. Se distinguen las que ofrecen datos objetivos de las que proporcionan datos subjetivos. Los métodos objetivos son aquellos que no exigen la participación del paciente. Entre ellos figuran las exploraciones electrofisiológicas del olfato o el gusto (electroolfatograma, potenciales evocados olfativos, electrogustometría) y las pruebas de imagen estructurales y funcionales de ambos sentidos (tomografía, resonancia magnética). La principal limitación de los métodos objetivos estriba en que solo pueden realizarse en centros muy especializados. Por este motivo no suelen emplearse en la práctica clínica, sino solo en los estudios de investigación.

La evaluación subjetiva, la más utilizada en el ámbito clínico, sí requiere la participación del paciente. Su principal desventaja es que los resultados que se obtienen dependen de factores difíciles de controlar. Destacan la disposición del paciente a colaborar, la cultura a la que pertenece (que determina la habituación a ciertos olores), además de una serie de factores ambientales y personales, como la edad y el sexo (que dan lugar a variaciones hormonales), los hábitos tóxicos (consumo de alcohol, tabaco, etcétera), los antecedentes clínicos y aspectos sociales (asociación de distintos olores a determinadas situaciones). Debido a la especificidad cultural y social en la identificación de los olores, cualquier olfatometría subjetiva, tanto si se realiza en adultos como en niños, debe estar validada con estudios en la población general a la que pertenecen los pacientes.

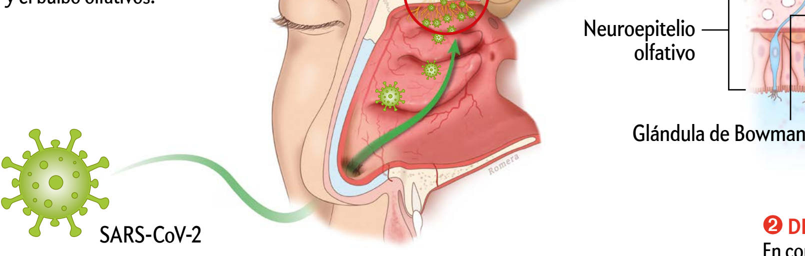
En los pacientes con COVID-19, la pérdida del olfato y el gusto suele ser detectada mediante métodos subjetivos, los cuales pueden ser cualitativos o cuantitativos. Los cuestionarios en papel o virtuales son sencillos de responder y dan una información cualitativa de la disfunción. El paciente contesta a preguntas genéricas, con respuesta habitualmente dual (sí o no); por ejemplo: «¿ha perdido usted el olfato o el gusto?».

Así trastoca el coronavirus el olfato

La percepción de los olores constituye un proceso finamente controlado por diversas estructuras del sistema nervioso central y periférico. En la infección por el SARS-CoV-2, el virus responsable de la COVID-19, un síntoma frecuente es la pérdida súbita del olfato. Abajo se ilustran los procesos celulares y neurobiológicos implicados en dicho síntoma y la forma en que puede recuperarse el olfato.

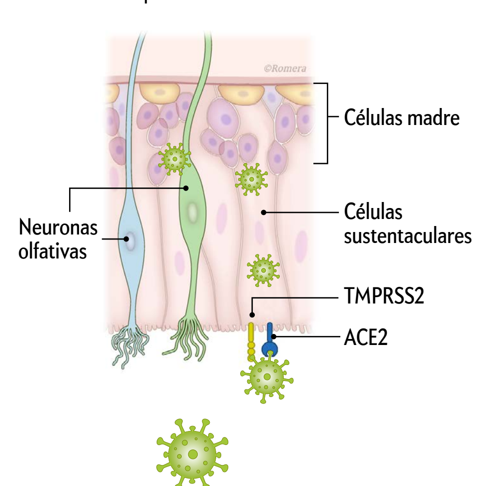


❶ EL VIRUS LLEGA A LAS FOSAS NASALES
A través del aire inspirado, el SARS-CoV-2 entra en las fosas nasales y, en la parte superior de ellas, alcanza el neuroepitelio y el bulbo olfativos.

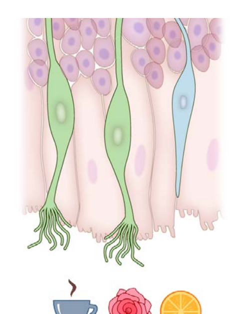


❷ DEL NEUROEPITELIO AL BULBO OLFATIVO
En condiciones normales, las moléculas olorosas alcanzan el neuroepitelio, ayudadas por el moco que segregan las glándulas de Bowman. Una vez allí, activan las neuronas olfativas, que reenvían las señales a las neuronas del bulbo olfativo, donde las señales se integran y se retransmiten al cerebro. Según su composición, un olor es capaz de activar múltiples tipos de neuronas (*azul*, *verde* y *rosa*) en diversos grados. Pero la llegada del SARS-CoV-2 altera dicho proceso.

❸ INFECCIÓN CELULAR
El virus infecta las células sustentaculares, que ofrecen soporte al neuroepitelio. Para entrar en ellas se sirve de dos receptores de su membrana plasmática: ACE2 y TMPRSS2. En cambio, el virus no ataca a las neuronas olfativas, que carecen de estos receptores.



❹ DEGENERACIÓN DEL NEUROEPITELIO
Como consecuencia de la infección, se produce una reacción inflamatoria local, con la liberación masiva de unas moléculas denominadas citocinas (*no representadas*), que ocasionan la degeneración y destrucción de todas las células que conforman el neuroepitelio, lo que provoca la pérdida súbita del olfato.



❺ NEUROGÉNESIS
Con el tiempo, las células madre (*amarillo*) se diferencian en otras (*violeta*) y regeneran todas las células del neuroepitelio. En la COVID-19, la neurogénesis se produce de forma espontánea o mediante entrenamiento olfativo, en el que el paciente aprende a identificar distintos olores que se le presentan.

Otro método subjetivo es la escala visual analógica (EVA), una línea horizontal de 0 a 10 centímetros que debe ser marcada por el paciente (0, cuando no hay pérdida de olfato, y 10, cuando esta es total), una prueba rápida, cuantitativa, segura y fácil de realizar en la práctica clínica diaria. Resulta especialmente útil en los brotes agudos de COVID-19, tanto para su uso presencial como en encuestas a través del teléfono, Internet o redes sociales.

Y, por último, existen las pruebas de olfatometría subjetiva, que proporcionan datos cuantitativos y completos sobre detección, memoria e identificación de olores y, en algunas, también de gustos. Una de ellas ha sido desarrollada por nuestro grupo, el BAST-24 (Barcelona Smell Test-24), que incluye 24 sustancias odorantes y los 5 gustos. En ella se presentan al paciente sucesivos tarros de cristal que contienen un gel impregnado con las diferentes sustancias odorantes a concentraciones conocidas.

Oltras olfatometrías utilizan rotuladores olorosos. O, en otras, los olores son liberados rascando el aroma microencapsulado en una etiqueta montada en un papel.

Las olfatometrías no se recomiendan en personas con COVID-19 activa, debido al riesgo de contagio entre pacientes y entre estos y el personal sanitario, a menos que se utilice una prueba en formato individualizado. O a menos que se adapte la prueba, como hemos hecho en la BAST-24: en cada tarro se unta una esponja sujeta a un palito, la cual se cambia para cada paciente.

Las pruebas cuantitativas permiten un diagnóstico más preciso de la pérdida del olfato en la COVID-19 que los cuestionarios cualitativos. Las primeras detectan la disfunción en entre un 70 y 80 por ciento de los pacientes, mientras que con los segundos la cifra desciende a entre el 40 y el 60 por ciento.

Por otro lado, la evaluación subjetiva de la capacidad gustativa se realiza mediante pruebas de gustometría química. Se trata de métodos muy útiles para diferenciar entre los trastornos del sabor (combinación de olfato y gusto) y del gusto solo (dulce, salado, amargo, ácido y umami). Consisten en aplicar en la lengua del paciente sustancias de distintos sabores, tras lo cual se le pregunta el momento en que lo detecta y a qué gusto corresponde. En el contexto de la COVID-19, la gustometría química debe limitarse a pruebas de formato individual para evitar los contagios, igual que sucede en la olfatometría subjetiva.



EN UNA OLFATOMETRÍA con la prueba BAST-24, se le presenta al paciente una sustancia odorante para determinar su capacidad de detección, memoria e identificación olfativa. La prueba consta de una batería de 20 odorantes olfativos (*rojo*), como el de la rosa, y 4 odorantes con un alto componente sensitivo (*amarillo*), como el de la mostaza. El test incorpora también los 5 gustos básicos (dulce, salado, amargo, ácio y umami) para la gustometría (*azul*).

CORTESÍA DE LOS AUTORES

HERRAMIENTA DIAGNÓSTICA

En marzo de 2020, y debido a una serie de casos esporádicos sobre todo en trabajadores sanitarios, las sociedades científicas de diversos países (Reino Unido, Estados Unidos, Italia, Francia y España) dieron la señal de alarma sobre la pérdida del olfato repentina, grave y con frecuencia aislada en los pacientes de COVID-19, por lo que propusieron que podría utilizarse como una posible herramienta para diagnosticar la enfermedad.

Tras un análisis inicial de los 56 primeros estudios publicados sobre COVID-19, el Grupo de Evidencia de la Universidad de Oxford puso de manifiesto que faltaban pruebas científicas que demostraran la asociación entre la pérdida de olfato y gusto y la enfermedad, y señalaron la necesidad de llevar a cabo nuevos estudios con un mayor rigor científico.

Desde marzo de 2020, se han publicado más de 100 estudios epidemiológicos sobre la pérdida del olfato y el gusto en la COVID-19, realizados principalmente en diferentes países de Europa, Asia y América. Los datos de estos estudios individuales demuestran que existe una gran variabilidad (entre el 5 y el 95 por ciento) en la proporción de los pacientes que presentan esta disfunción sensorial olfativa o gustativa, lo cual se debe muy probablemente a la diferente metodología empleada. Aun así, los metanálisis (análisis agrupados de los estudios individuales) revelan que, en conjunto, la pérdida de olfato afecta a entre el 70 y el 80 por ciento de los pacientes cuando se utilizan pruebas subjetivas cuantitativas de olfato (EVA o BAST-24), y a entre el 45 y 55 por ciento cuando se emplean métodos cualitativos (cuestionarios).

La mayoría de los estudios no discriminan claramente entre la pérdida del olfato y el gusto, con lo que la prevalencia que se mide de disfunción gustativa suele ser similar a la olfativa. Entre los pocos trabajos que sí han realizado una clara diferenciación, la pérdida del olfato suele ser superior a la del gusto. También se ha observado que esta última se asocia a una mayor gravedad de la COVID-19 y normalmente se recupera antes que el olfato.

En un estudio realizado en España por investigadores de 15 hospitales y en el que participó nuestro grupo, evaluamos la pérdida del olfato y el gusto en más de 800 pacientes de COVID-19 mediante cuestionarios (evaluación cualitativa) y EVA (cuantitativa). Más de la mitad mostró una pérdida del olfato y el gusto, y un tercio sufrió una pérdida sensorial repentina y grave que se manifestó como primer o único síntoma. Además, los pacientes no hospitalizados (menos graves) y menores de 60 años presentaron con mayor frecuencia esta disfunción. En un segundo estudio con pacientes ambulatorios de COVID-19 llevado a cabo por investigadores de cinco hospitales españoles, la frecuencia de la pérdida del olfato y el gusto fue superior al 60 por ciento, siendo mayor en los pacientes de menos de 45 años y en mujeres.

¿PODEMOS TRATAR LA PÉRDIDA DE OLFATO?

Los estudios realizados hasta ahora han demostrado que entre un 60 y 70 por ciento de los pacientes con COVID-19 que han perdido el olfato o el gusto recuperan, parcial o totalmente, dichos sentidos durante el primer mes. De hecho, los datos disponibles, correspondientes a los seis meses después de la infección, indican que en ese período más del 80 por ciento de los pacientes presentan una mejoría espontánea de la disfunción

olfativa y, sobre todo, gustativa. No obstante, entre un 20 y un 25 por ciento de los pacientes puede que no lleguen a recuperar, ni siquiera parcialmente, el sentido del olfato tras un año de la infección. El mecanismo fisiopatológico y los factores asociados a esta secuela de la COVID-19 todavía se desconocen.

De momento, no existe ningún tratamiento farmacológico que mejore la pérdida del olfato como consecuencia de una infección vírica, incluida la COVID-19. Los corticoides intranasales o sistémicos no han demostrado resultar eficaces para recuperar el olfato, aunque sí pueden disminuir la expresión de la proteína receptora ACE2 (que facilita la infección de las células). No obstante, se desaconseja interrumpir su uso en pacientes de COVID-19 u otra infección vírica que sufran inflamación respiratoria crónica asociada a rinitis alérgica, rinosinusitis crónica o asma.

La única terapia que se ha demostrado eficaz en la disfunción olfativa a causa de un virus o un traumatismo craneal es la rehabilitación o entrenamiento olfativo. Se basa en la exposición diaria de los pacientes a olores diversos, ya sean de baterías de entrenamiento validadas (por ejemplo, BASTAT-6) u olores de origen casero, durante un tiempo prolongado (entre tres y seis meses) con el propósito de estimular a las células madre de la mucosa olfativa y del bulbo olfativo para que se conviertan en neuronas olfativas maduras. En el caso de la COVID-19, se recomienda iniciar este entrenamiento después de un mes, o incluso antes, de la pérdida sensorial, y prolongarla hasta lograr la recuperación.

TRASTORNO PERSISTENTE

Puesto que el curso temporal de la pérdida del olfato y el gusto en la COVID-19 aún no está claramente demostrado, se requieren estudios epidemiológicos a largo plazo (más de un año), que incluyan pruebas de olfato, para confirmar y caracterizar la persistencia de dicho síntoma. No solo es necesario investigar su gravedad, prevalencia e impacto en la calidad de vida de los pacientes, sino también la morbilidad que causa a largo plazo.

Desconocemos por qué la mayoría de los pacientes de COVID-19 sufren pérdida de olfato mientras que otros no. Tampoco sabemos por qué, en la mayoría de los que padecen dicho síntoma, este se resuelve en días o semanas, y en otros persiste como secuela durante meses o incluso de forma permanente. Asimismo, deben esclarecerse los mecanismos biológicos y fisiopatológicos involucrados en estas diferencias.

Varias hipótesis postulan los mecanismos que podrían estar involucrados en la pérdida persistente del olfato y explicarían las diferencias en la manifestación de este síntoma. Se cree que uno de los factores que influyen es el grado de afectación del SARS-CoV-2 y el daño variable que provoca en las estructuras olfativas periféricas (neuroepitelio olfativo) y centrales (bulbos olfativos).

Otra explicación es la diferente proporción de tipos celulares (células maduras o células madre) dañados en el neuropitelio, que puede dar lugar a patrones de recuperación variables. Por ejemplo, una gran afectación de las células madre puede condicionar o retrasar la formación de nuevas neuronas olfativas.

Según otra hipótesis, la destrucción de las neuronas olfativas por el virus, como consecuencia de la afectación de las células sustentaculares, puede prevenir la propagación de este a los bulbos olfativos, lo que actuaría como una respuesta protectora; de este modo, la persistencia de la pérdida del olfato podría indicar un fallo en esta línea de defensa.

También se plantea si la pérdida persistente de olfato podría estar relacionada con algún fallo en la respuesta inmunitaria, tanto celular (linfocitos T de memoria) como por anticuerpos (inmunoglobulinas M y G).

Y, por último, se piensa que los factores genéticos y epigenéticos del paciente pueden desempeñar un papel importante en la vulnerabilidad individual a la pérdida persistente del olfato. Todas estas hipótesis deberían explorarse mediante nuevos estudios.

¿CÓMO ENFOCAR LA INVESTIGACIÓN FUTURA?

Durante el último año se han generado numerosas preguntas científicas todavía no resueltas: ¿por qué unos pacientes con COVID-19 manifiestan pérdida del olfato y otros no?; en los que presentan disfunción olfativa, ¿por qué algunos lo recuperan con rapidez y otros de forma lenta o no la recuperan?; ¿cuáles son los mecanismos causantes de la mejoría del olfato por el entrenamiento olfativo?; ¿qué factores individuales, ambientales o genéticos se asocian a esta disfunción y a su recuperación?, o ¿qué similitudes y diferencias existen en los mecanismos de acción de la pérdida del olfato y su recuperación cuando es causada por el SARS-CoV-2 o por otros virus?

Las investigaciones futuras de nuestro grupo se dirigirán fundamentalmente a estudiar la pérdida persistente del olfato como una secuela importante de la COVID-19 y a intentar dar respuesta a algunas de las preguntas no resueltas. Ello incluirá la identificación de factores de riesgo para estos cambios moleculares, genómicos y epigenómicos que expliquen la instauración y persistencia de la pérdida del olfato en la COVID-19, así como la detección de posibles dianas terapéuticas que permitan desarrollar nuevas estrategias de tratamiento y protocolos de prevención.

Tras recuperarse de la fase aguda de la COVID-19, un alto porcentaje de pacientes van a tener una pérdida persistente del olfato como secuela, problema que seguirá creciendo, dada la alta incidencia actual de la enfermedad en todo el mundo. A pesar del esfuerzo global que se está realizando en diferentes frentes y ámbitos, la infección por el SARS-CoV-2 continúa causando una gran morbilidad y mortalidad, y todavía hay múltiples incógnitas que necesitan resolverse para poder hacer frente a la pandemia con mayor eficacia.

PARA SABER MÁS

The sense of smell in chronic rhinosinusitis. Joaquim Mullol et al. en *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, vol. 145, págs. 773-776, marzo de 2020.
Prodromal Parkinson disease in patients with idiopathic hyposmia. Paula Marrero-González et al. en *Journal of Neurology*, vol. 267, págs. 3673-3682, diciembre de 2020.
Self-reported taste and smell disorders in patients with COVID-19: distinct features in China. Jia Song, et al. en *Current Medical Science*, vol. 41, págs. 14-23, febrero de 2021.
Chemosensory dysfunction in COVID-19 out-patients. María Jesús Rojas-Lechuga, et al. en *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, vol. 278, págs. 695-702, marzo de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Comienza a aclararse la misteriosa pérdida de olfato debida a la COVID-19. Stephani Sutherland en *IyC*, febrero de 2021.
Del olfato al estado mental. Frank Luerweg en *MyC*, n.º 107, 2021.

¿POR QUÉ JUEGAN LOS ANIMALES?

Retozar mejora la forma física y la cognición, a la par que facilita la adquisición de otras habilidades necesarias para la supervivencia y la reproducción

Caitlin O'Connell







Caitlin O´Connell es ecóloga y especialista en comportamiento animal de la Escuela de Medicina de Harvard. Sus investigaciones se centran en el comportamiento y la comunicación de los elefantes.



AÍA LA TARDE EN EL PARQUE NACIONAL DE ETOSHA, EN NAMIBIA, CUANDO entre el matorral desértico divisé una familia de elefantes en el extremo sur del claro. Estaba oteando el horizonte subida a la torre de observación desde donde mis colaboradores y yo estudiamos lo que ocurre en la charca de Mushara. Los paquidermos no habían acudido antes por culpa del viento, pues este interfiere en su comunicación vocal, necesaria para la vigilancia mutua, pero ahora, con el aire en calma, hacían acto de presencia los primeros.

A juzgar por la cantidad de trompas en alto que cataban el aire, la manada estaba impaciente por salir al descubierto y llegar al agua. Los machos jóvenes parecían especialmente ansiosos, no solo impelidos por la sed, sino también por cuentas pendientes que saldar. La sequedad que avanza en paralelo con el invierno obliga a los elefantes a alejarse cada vez más de las fuentes de agua, en busca de alimento. A veces transcurren días hasta que regresan a la charca para abrevar y se produce el reencuentro.

No tardé en averiguar por qué la manada se estaba refrenando: otra familia se estaba congregando en aquel momento en el bosque del sureste y se dirigía hacia nuestra posición, de ahí la cautela de las hembras adultas. Estas permanecían inmóviles con los pies clavados y las orejas erguidas, mientras olfateaban el escaso viento en busca de peligros. Salir a campo abierto no solo expondría a la familia a los depredadores, sino que el encuentro con otra familia de mayor rango podría acabar en un enfrentamiento. En cambio, ese tipo de contactos brindaban más oportunidades de juego a los más jóvenes del grupo. Así que, después de escudriñar el claro, con un barrito sordo y un vaivén de orejas la matriarca dio la orden de marchar hacia la orilla.

Durante nuestra campaña de campo en el invierno austral, el final de la tarde es para mí el momento favorito del día; el aire se enfría rápidamente cuando el sol raya el horizonte y colorea a los elefantes de un rosa brillante. Permanezco junto a mis compañeros en la torre, con un refrigerio a mano y los prismáticos apuntados hacia el horizonte, a la espera de alguna de nuestras queridas familias residentes. En el curso de esas visitas diarias siempre aprendo algo nuevo de ellos, sobre todo cuando juegan.

Durante mis largas horas de observación en aquella charca he sido testigo del importante papel que el juego desempeña en la crianza y en las relaciones familiares de los elefantes. Estas observaciones, a menudo caóticas, han despertado en mí un vivo interés por saber más acerca del juego animal y las ventajas que este brinda no solo a los elefantes, sino también al conjunto de los animales sociales, el ser humano entre ellos. A semejanza de otras formas de interacción, el juego se rige por reglas y es esencial para el desarrollo de las facultades físicas y cognitivas necesarias para la supervivencia y la reproducción.

EN SÍNTESIS

Lejos de ser un mero entretenimiento, el juego desempeña un papel clave en la crianza y en las relaciones familiares y sociales de los animales gregarios.

En todas las modalidades conocidas en el reino animal, ya sea el juego social, locomotor o imaginativo, este adopta formas ritualizadas de comportamientos propios de la edad adulta.

Entre las virtudes del juego destacan la facilitación del aprendizaje y de la adquisición de habilidades por los jóvenes.

PÁGINAS ANTERIORES: JOACHIM SCHMEISSER





JUGAR AGUDIZA LAS HABILIDADES NECESARIAS PARA SOBREVIVIR: las crías de elefante invitan a jugar a sus compañeros colocando la trompa sobre la cabeza del otro (*abajo a la derecha*). Las peleas fingidas son un buen ejercicio donde se prueban y se practican maniobras de defensa en condiciones seguras (*izquierda*). Un elefante de más edad se agacha para dar la oportunidad a un joven macho de medir sus fuerzas con él (*arriba a la derecha*).

REGLAS Y NORMAS

La gente suele creer que el juego es una actividad reservada para el tiempo libre, ajena por completo al aprendizaje de las aptitudes necesarias para prosperar en la vida, como son cazar, aparearse y escapar de los depredadores. No hay duda de que jugar resulta entretenido para los participantes, a veces también para los observadores, pero los comportamientos lúdicos evolucionaron como formas ritualizadas de las habilidades que los animales tendrán que poner en práctica más adelante, en la vida adulta. Sirven, pues, como medio de perfeccionamiento.

Participar en él permite experimentar con nuevos comportamientos en un entorno protegido sin consecuencias peligrosas. El código de conducta que rige el juego permite explorar muchos resultados posibles.

Los animales aprenden las reglas desde muy temprana edad. En el perro, inclinarse y estirar las patas delanteras es una invitación universal a jugar que desencadena la misma postura en el receptor de la señal, a la que inevitablemente le siguen las persecuciones y los mordiscos fingidos. Los chimpancés y los gorilas invitan al juego mostrando los dientes superiores e inferiores, en lo que los primatólogos denominan «cara de juego», comparable a la risa humana.

Cuando un joven elefante macho desea jugar con un compañero de edad similar, yergue en alto la trompa ante este como invitación. Lo más habitual es que el gesto siguiente consista en apoyarla sobre la cabeza del invitado, cosa que en los adultos es señal de dominancia, pero en las crías no tarda en desatar una animada pelea fingida. Los encuentros son muy variados, desde suaves caricias hasta fuertes cabezazos y empujones con las trompas o los colmillos entrelazados. La diversión dura segundos o minutos en los más jóvenes, a veces más si se trata de adolescentes o adultos jóvenes. Los combates simulados ofrecen a los contendientes la oportunidad de poner a prueba sus dotes combativas en las disputas por las hembras, que vendrán cuando alcancen la madurez sexual y experimenten el celo, en torno a los 25 años.

Cuando un joven se siente especialmente osado llega a alejarse de la protección materna para retar a algún pariente lejano. Si la incursión la aleja demasiado o si el contrincante se vuelve demasiado violento, el valiente regresará raudo junto a su madre agitando las orejas y trazando con la trompa movimientos similares a los de un yoyó mientras se bate en retirada.

En ocasiones una hermana mayor supervisa el juego. Siempre vigilantes, las hermanas forman parte de la red de cuidadores que facilita el juego de los jóvenes e intervienen si una de las crías se propasa en la pelea, momento en que una de las protectoras de mayor edad, una madre de alto rango, le propinará una sacudida con la trompa para poner fin al alboroto.

TIPOS DE JUEGO



Los etólogos reconocen tres categorías básicas de juego. La primera es el juego social, consistente en cualquier travesura que involucre a otros. La segunda es el juego locomotor, con actividades como correr, caminar, saltar o abalanzarse unos sobre otros, con el que se ejercitan las habilidades motrices. En las especies que son presas de otras, ayuda a perfeccionar las tácticas de evasión como, por ejemplo, los grandes saltos y rebotes que efectúa el antílope springbok mientras corre en tropel, con los que cae en lugares imprevisibles para el perseguidor. En los elefantes ayuda a refinar las habilidades necesarias para eludir a los depredadores, además de las estrategias de huida ante pretendientes agresivos o rivales que buscan infligir heridas mortales. Y viceversa, los jóvenes depredadores como las crías de león agudizan sus dotes de caza. Las persecuciones y las peleas con los compañeros de camada y los mordiscos fingidos en la columna vertebral y la garganta simulan la captura de la presa y su muerte por asfixia o por sección de la médula espinal.

Numerosas especies, también la nuestra, participan en una modalidad del juego locomotor, el simulacro de lucha, donde se miden las fuerzas en un entorno seguro con reglas conocidas por todos. Para un elefante, la pelea ficticia es el equivalente a echar un pulso entre amigos. Cuando el juego gana en elaboración y complejidad pasa de ser esto último a convertirse en algo parecido a las artes marciales, donde ambos participantes practican sus dotes y prueban soluciones innovadoras con las que más adelante podrían evitar una lucha a muerte. De igual modo es una oportunidad para poner a prueba los límites, valorar quién puede ser de confianza y aprender el lenguaje corporal.

La tercera categoría básica es el juego con objetos del entorno. En el caso del elefante se puede tratar de un palo o de una rama que toquetear, asir o lanzar con la trompa. En cautividad disfrutan jugando con pelotas o arrastrando neumáticos por diversión. En ocasiones el objeto puede ser otro animal, como una cebra o una jirafa, lo que supone una oportunidad irresistible para correr tras él. Una vez, un macho de cuatro años llamado Leo enseñó a su hermano pequeño, Liam, lo divertida que podía ser una persecución, haciendo que este siguiera sus pasos tras una jirafa que huía despavorida.

Dos modalidades más se han documentado exclusivamente en los grandes simios y en el ser humano. El juego en equipo combina el juego social, el locomotor y el practicado con objetos. El fútbol, el hockey sobre hierba o el polo son ejemplos de juegos tradicionales que se convirtieron en deportes dotados de reglas específicas (entre los grandes simios solo los individuos cautivos que crecen bajo la influencia humana participan en juegos formales). La otra variedad que parece ser privativa de los simios antropomorfos es el juego imaginativo. Por ejemplo, un chimpancé salvaje puede llevar en brazos un tronco pequeño simulando que se trata de un bebé, o un niño manipular un juguete invisible o crear una barrera invisible que los adultos deben respetar.

Jugar proporciona un entorno en el que experimentar sin riesgo

ALGO MÁS QUE DIVERSIÓN Y JUEGOS

Jugar brinda un entorno en el que experimentar con el riesgo. Cuando un cachorro de león tolera que otros se abalancen sobre él está renunciando a una parte del control sobre su cuerpo y se pone en desventaja. Marc Bekoff, de la Universidad de Colorado en Boulder, y sus colaboradores han postulado que el juego incrementa la versatilidad de los movimientos desplegados para recuperarse de las pérdidas de equilibrio y refuerza la capacidad para afrontar las situaciones estresantes inesperadas. El objetivo no es ganar, sino mejorar las capacidades, a veces quedando deliberadamente en inferioridad de condiciones.

Cuando el cachorro es abordado por sus compañeros de camada, los papeles pueden invertirse de modo que uno de ellos se sitúe en inferioridad de condiciones permitiendo que otro se enfrente a él. Esta estrategia arriesgada requiere confianza, pero es un buen método para adquirir fuerza y agilidad. También promueve la cooperación. En la manada de lobos criada por Jim y Jamie Dutcher en las montañas Sawtooth de Idaho (EE.UU.), el individuo dominante disminuía su velocidad para que un subordinado cercano le diera alcance y se enfrentase a él. En los elefantes he visto varias veces cómo las crías macho de más edad se agachan para que otra cría mucho más joven




LOS ANIMALES APRENDEN las reglas del juego desde muy temprana edad. En los perros, el estiramiento hacia delante en postura de «reverencia» constituye una invitación universal al juego (*izquierda*). Los jóvenes depredadores, como las crías de león, practican las habilidades necesarias para la caza a través del juego (*derecha*).

NICOLA GAVIN, ALAMY STOCK PHOTO (*izquierda*); MANOJ SHAH, GETTY IMAGES (*derecha*)

pueda enfrentarse a ellos. Es como si el hermano mayor no hiciese alarde de su fuerza y dejase ganar un pulso al hermano pequeño.

Hacer el tonto es otro aspecto importante del juego, uno que nos hace salir de nuestra zona de confort y nos obliga a probar nuevas estrategias. Moverse, comportarse e incluso comunicarse de formas absurdas nos ayuda a pensar de forma más amplia y creativa. Se ha demostrado en muchas especies, incluso en robots, que es posible resolver problemas mientras se está inmerso en la absurdidad del juego. Cuando el informático Hod Lipson, de la Universidad de Columbia, dio a sus robots dotados de inteligencia artificial la oportunidad de jugar bailando con movimientos aleatorios, superaron a otros iguales cuando afrontaban sucesos inesperados. La información obtenida a partir del posicionamiento de los movimientos aleatorios llevó a un robot a idear soluciones creativas para mantener el equilibrio después de perder una extremidad. De la misma forma, cuando los leones marinos juegan en las olas, a menudo se lanzan al aire a mitad de camino frente a olas monstruosas, como las que baten la costa de Santa Cruz, en California. Esa es justo la clase de comportamiento precisa para eludir el ataque del jaquetón, su principal depredador aparte de las orcas y del hombre.

El juego también genera confianza. En la Universidad de Viena, Thomas Bugnyar y sus colaboradores descubrieron que los cuervos fingen guardar alimentos sustanciosos y luego observan a sus compañeros para averiguar cuáles son de fiar. Aprender pronto a reconocer los competidores de los posibles colaboradores tiene ventajas obvias, ya sea con la idea de ganar aliados, formar una coalición dentro de un grupo o reparar relaciones rotas.

FAMILIAS REUNIDAS

«¡Se acercan por el sudeste!», grité desde la torre de Mushara cuando vislumbré una línea polvorienta de moles grisáceas en el margen del claro, durante la campaña de 2018. Ahora tocaba identificarlos: un colmillo quebrado, una muesca en el borde inferior de la oreja izquierda o un corte en V en el borde superior de la derecha nos permitirían averiguar de qué familia se trataba. Quien la identificase primero recibiría un trago extra al anochecer.

Aquel día la familia recién llegada resultó ser la que habíamos bautizado como la de los «actores». Era la primera vez que la veíamos aquella temporada y nos emocionamos al ver a un nuevo miembro: Susan, de alto rango, reconocible por su colmillo izquierdo en forma de daga, tenía un pequeño retoño, Liam. Y Wynona, de rango bajo, a la que le faltaba ese mismo colmillo, llevaba a remolque a Lucy, de dos años. Llevábamos varias temporadas siguiendo con atención la conflictiva relación de estas dos madres, sobre todo durante la temporada de 2012, cuando ambas parieron a Leo y a Liza.

Susan había atormentado a Wynona hasta el final de la gestación, cargando contra ella agresivamente cada vez que se acercaba a la orilla a beber. La tensión era tal que, cuando Wynona se separó de la familia para dar a luz, rodeada por su hija Erin y sus crías, me preocupé por la vida del retoño si se volvían a



ENTRE LOS ELEFANTES EN LIBERTAD el juego se desarrolla casi siempre en grupo. En el caso de los más jóvenes, suele incluir subirse encima de los hermanos, primos o, si se lo permiten, incluso de los adultos del grupo.

juntar. No tuvo lugar celebración alguna ni presenciamos ninguna reunión en la que presentase el bebé a la familia. Supuse que los días de Wynona como miembro de la manada de los actores estaban contados.

Como esperábamos, Wynona se separó de la familia y se convirtió en matriarca de su propio núcleo familiar. Todo siguió así por espacio de cuatro años hasta la llegada de otro bebé, Lucy, en 2016, momento en que volvió a cambiar de nuevo la dinámica del gran clan familiar. El juego es un factor importante que contribuye a la reunificación.

¿Cuántas veces hemos visto en nuestras familias que los rencores de las generaciones pasadas se dejan de lado gracias a los lazos forjados por la siguiente generación a través del juego?

La hermana mayor de Lucy, Liza, era un bebé tímido que siempre andaba apegado a su madre y a los parientes más cercanos. Wynona organizó sus desplazamientos para evitar todo contacto con el gran grupo familiar en la charca de Mushara o en sus inmediaciones. Solían llegar un día antes o después que la familia de los actores; por norma general, después. En las raras ocasiones en que coincidían, justo cuando el gran clan acababa su visita, Liza no se alejaba de su madre para entablar contacto con aquellos extraños. ¿Quién la podría culpar? Susan estaba dispuesta a asestarle un golpe con su colmillo afilado o con la trompa, lo que le pareciese más conveniente, para dejar claro que los bebés de bajo rango no podían jugar con la aristocracia. Las crías de la pequeña pero creciente familia de Wynona no tenían oportunidad de conocer a los miembros de la gran familia.

Con Lucy todo aquello cambió. De buen principio demostró ser bastante extrovertida. Tal vez nacer en una familia muy pequeña alimentó su curiosidad y su deseo de conocer a la gran familia en los raros encuentros de ambas. Y no se dejó amilanar por las reprimendas de las madres de alto rango, con la visible irritación de la siempre vigilante Susan.

Ahora, a sus dos años, Lucy sabía cómo corretear entre los adultos fuera del alcance de sus trompas sin salir malparada, mientras hacía oídos sordos a las llamadas al orden de su madre. Se comportaba de la misma guisa que Leo, el retoño de Susan, nacido en la misma temporada que Liza, la hermana mayor de Lucy. Cuando registrábamos la distancia que separaba a Leo de su madre en la charca siempre era mucho mayor que la que mantenía Liza de la suya. Supusimos que aquella diferencia obedecía al sexo y a los intentos precoces de los machos por ser independientes. Pero la llegada de Lucy nos mostró que la historia no era tan sencilla.

Lucy pasaba mucho tiempo muy alejada de su madre y jugaba con las crías de madres de todos los rangos. Cuando llegaba la hora de abandonar la charca y marcharse cada uno por su lado, tal como dictaba la política familiar, Lucy lo hacía imposible. Tan enfrascada andaba jugando con las demás crías que su madre no podía sacarla de allí, así que Wynona no tuvo más remedio que modificar su comportamiento.

En lugar de alejarse de la charca en dirección opuesta a la de la familia de los actores, Wynona, su hija mayor Erin y las crías de esta se daban la vuelta y seguían al resto del gran clan, por temor de perder a la pequeña. No había garantías de que las demás madres fueran a proteger a Lucy, y menos aún permitirle mamar, pues eso significaría renunciar a una parte de la leche destinada a sus crías. Pero en 2018 Wynona se había reintegrado plenamente en la familia de los actores, fuera o no su deseo.

Cada vez que veo cómo se desarrolla esta dinámica sonrío. ¿Cuántas veces hemos visto en nuestras propias familias que los rencores de las generaciones pasadas se dejan de lado gracias a los lazos forjados por la siguiente generación a través del juego?

Deberíamos jugar todos los días. Sonreír y reír son comportamientos contagiosos que facilitan la unión, son curativos y, lo más importante, no tienen por qué robarnos mucho tiempo. La próxima vez que crea estar demasiado ocupado para participar en un juego banal o no quiera enfrentarse a esa reunión familiar, saque tiempo y reúna la voluntad para ir. Le sorprenderá el resultado: puede que se le ocurra una magnífica idea para una presentación de trabajo o que lime asperezas con un familiar gracias a una sonora carcajada compartida.

Nuestra naturaleza tan adaptable e innovadora está enraizada en el juego. Le doy las gracias a mi elefanta favorita, Wynona, y a su hija Lucy por recordarme que siempre hay algo nuevo que podemos aprender jugando, y que nunca somos demasiado viejos para interiorizar esas lecciones. El juego puede dar sus frutos en formas insospechadas: ayuda a forjar nuevos vínculos, reconcilia a las familias divididas, mejora la capacidad de afrontar los problemas y la salud en general y facilita la cooperación y la innovación. A la vista de todas esas virtudes, ¿podemos permitirnos no jugar? IyC

PARA SABER MÁS

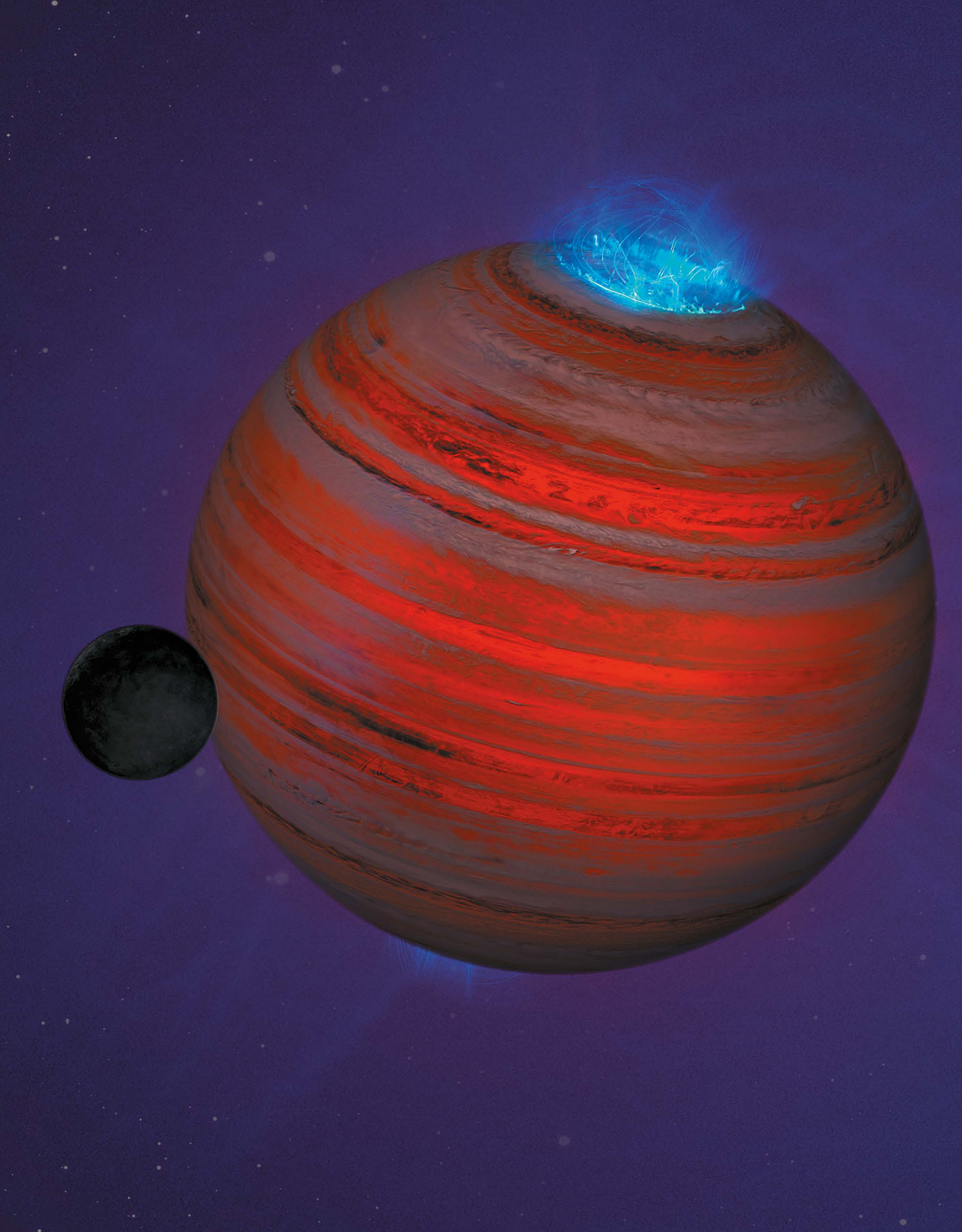
Age-based variation in calf independence, social behavior and play in a captive population of African elephant calves. Patrick T. Freeman et al. en Wiley Online Library, 2 de junio de 2021.

The first 'Google Translate' for elephants debuts. Rachel Nuwer en *Scientific American*. Publicado en línea el 9 de junio de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

¿Por qué a los pulpos les gusta jugar? Joachim Marschall en *MyC*, enero/febrero de 2011.

Lucha animal. Gareth Arnott y Robert W. Elwood en *IyC*, diciembre de 2019.



ASTRONOMÍA

Enanas marrones

A medio camino entre las estrellas y los planetas, las enanas marrones están ayudando a resolver misterios sobre ambos

Katelyn Allers

Ilustración de Mark Ross

Katelyn Allers es astrónoma. Su investigación se centra en las estrellas de baja masa y en las enanas marrones. Ha sido profesora en la Universidad Bucknell, en Pensilvania, y ahora produce materiales de formación digital en Northwest Registered Agent.



«RESPIRA, RESPIRA», ME REPETÍA COMO UN MANTRA. A 5600 METROS de altitud, mi cuerpo reclamaba oxígeno y tenía que concentrarme en llevar suficiente aire a los pulmones. Estaba en la cima del Cerro Toco, un estratovolcán que domina el llano de Chajnantor, en Chile. Esta meseta alberga el Gran Conjunto Milimétrico/Submilimétrico de Atacama (ALMA), uno de los principales radiotelescopios del mundo. Entre la tenue atmósfera y el árido terreno rojo de la montaña, me sentía como si estuviera en Marte. Mis colaboradores y yo estábamos comprobando las condiciones atmosféricas del Cerro Toco. Si eran lo bastante buenas, tal vez justificaran los retos técnicos de construir un observatorio en un lugar tan elevado y remoto.

La atmósfera terrestre es un problema para los astrónomos, y las nubes frustran a más de un observador. La turbulencia atmosférica difumina la luz de las estrellas, haciendo que parezcan bailar y titilar cuando están cerca del horizonte. Las moléculas de agua y dióxido de carbono presentes en la atmósfera absorben la luz estelar incidente, sobre todo la infrarroja. Pero, dado que más de la mitad del aire de la Tierra se encuentra por debajo de la cima del Cerro Toco —como mis ardientes pulmones se empeñaban en recordarme—, esperábamos que un nuevo telescopio infrarrojo instalado allí pudiera realizar nuevos y emocionantes descubrimientos.

El espíritu aventurero que me había llevado a esa cumbre había despertado mi fascinación por la astronomía infrarroja: el estudio del cosmos en longitudes de onda demasiado largas para ser percibidas por el ojo humano. Esta luz suele proceder de los objetos más tenues y distantes que podemos observar. Entre los astros que se distinguen mejor en el infrarrojo se encuentran las enanas marrones. Cuando hice mi doctorado, a principios de la década de 2000, estos objetos se acababan de descubrir y representaban todo un misterio. Llegué a sentirme cautivada por esos extraños orbes que, en cuanto a su clasificación, ocupan una zona limítrofe entre las estrellas y los planetas. Me preguntaba dónde y cómo se habían formado y cómo eran. E investigando sobre ellas aprendí que, además de ser fascinantes en sí mismas, las enanas marrones constituyen un importante puente para entender mejor tanto los planetas como las estrellas, ya que poseen temperaturas y masas intermedias entre las de ambos.

Años después, quienes investigamos las enanas marrones disfrutamos de un momento dulce: aún quedan muchos de estos astros por descubrir, y podemos aprovechar la profusión de estudios anteriores para desvelar nuevos detalles de los procesos físicos que ocurren en ellos. Por fin disponemos de las herramientas técnicas necesarias para estudiar su atmósfera, así como la velocidad a la que rotan y la de sus vientos. Y también para determinar si podrían incluso albergar planetas propios.

ESLABÓN PERDIDO

La mayoría de las estrellas obtienen energía a partir de la fusión del hidrógeno, un proceso sorprendentemente estable que mantiene las estrellas ardiendo a la misma temperatura y con el mismo brillo durante miles de millones de años. Pero si una

EN SÍNTESIS

En la galaxia existen astros que no pueden clasificarse como estrellas ni como planetas. Conocidos como «enanas marrones», fueron descubiertos a finales del siglo pasado. Hoy se sabe que son casi tan abundantes como las estrellas.

En las últimas dos décadas los astrónomos han logrado esclarecer numerosas características de estos objetos. Su mecanismo de formación es similar al de las estrellas, pero son demasiado pequeños para sustentar procesos de fusión nuclear.

La atmósfera de las enanas marrones puede presentar nubes compuestas de minerales y, al igual que los planetas gigantes gaseosos, suelen exhibir campos magnéticos y auroras. Se cree que estos astros podrían incluso albergar sus propios planetas.

aspirante a estrella no llega a alcanzar temperaturas o presiones lo bastante altas para sustentar la fusión del hidrógeno, se convertirá en una enana marrón: un astro con una masa máxima del 8 por ciento de la del Sol, o unas 80 veces la de Júpiter.

Varios estudios recientes han revelado que las enanas marrones son casi tan comunes como las estrellas y que se encuentran por todas partes. Se han avistado en los «viveros estelares» donde crecen las jóvenes protoestrellas, y también emparejadas con enanas blancas en sistemas binarios, lo que indica que evitaron ser engullidas por su compañera durante su fase anterior de gigante roja. (El Sol, una enana amarilla, se convertirá con el tiempo en una enorme gigante roja y, tras morir, acabará sus días como enana blanca.) Algunos de los sistemas estelares más próximos al Sol constan de enanas marrones: en concreto, el tercero y el cuarto más cercanos, situados a 6,5 y 7,3 años luz de distancia y tan solo superados por Alfa Centauri y la estrella de Barnard. Y sin embargo, a pesar de su ubicuidad, la mayoría de la gente nunca ha oído hablar de las enanas marrones.

Aunque no fusionan hidrógeno, las enanas marrones emiten luz: radiación térmica asociada a su calor interno. Comienzan siendo objetos relativamente calientes, a unos 3000 kelvin, pero su temperatura y brillo disminuyen a lo largo de los siguientes miles de millones de años. Las enanas marrones nunca mueren, sino que se siguen enfriando y apagando durante toda la eternidad. La enana marrón más gélida conocida se halla a una temperatura inferior al punto de congelación del agua. Debido a su baja temperatura, emiten la mayor parte de la luz en el infrarrojo. Son demasiado tenues para distinguirlas a simple vista en el cielo nocturno; pero, si pudiéramos verlas de cerca, es probable que presentaran un tono apagado, entre rojo anaranjado y magenta.

En las más de dos décadas transcurridas desde que los astrónomos comenzaran a estudiar las enanas marrones, nos hemos hecho una idea bastante clara de sus características básicas. Al igual que el Sol, se componen casi por completo de hidrógeno. Sin embargo, su atmósfera superior está lo bastante fría para permitir la síntesis de diversas moléculas. En casi todas las enanas marrones se han observado indicios de vapor de agua. A medida que se van enfriando, su química atmosférica cambia y comienzan a predominar otras moléculas y nubes. La evolución de la atmósfera de una enana marrón depende de su masa y de su edad. Imaginemos, por ejemplo, una enana marrón con una masa 40 veces mayor que la de Júpiter. Durante los primeros 100 millones de años, su composición atmosférica será similar a la de una enana roja e incluirá óxido de titanio y monóxido de carbono. Cuando tenga entre 100 y 500 millones de años, la atmósfera se enfriará y se formarán nubes de polvo hechas de minerales como enstatita y cuarzo. Unos 1000 millones de años después, las nubes se dispersarán y se hundirán, y el metano se convertirá en la especie molecular dominante de la atmósfera superior. La enana marrón más fría conocida muestra indicios de nubes de hielo de agua, así como de vapor de agua y metano. Cabe esperar que su atmósfera contenga cantidades significativas de amoníaco, algo similar a lo que vemos en Júpiter.

Sin embargo, y más allá de estas propiedades, aún ignoramos numerosos detalles de estos objetos. No en vano, su naturaleza misteriosa ha inspirado algunas ideas poco realistas. En su día se pensó que las enanas marrones podían dar cuenta de una parte de la materia oscura. Pero la idea se abandonó enseguida cuando quedó claro que emiten luz —es decir, que no son oscuras— y que su contribución a la masa total de la galaxia es pequeña. En fecha más reciente, algunos científicos han propuesto que en la fría atmósfera superior de estos astros podría surgir la vida. Una idea que otros expertos no tardaron en rebatir, puesto que la dinámica atmosférica llevaría cualquier forma de vida hacia las capas más profundas, calientes e inhabitables.

Por último, existe también el bulo del «cataclismo de Nibiru», una profecía de 1995 que predecía un inminente y desastroso encuentro entre la Tierra y una enana marrón. Los astrónomos estaríamos encantados de ver una enana marrón de cerca, pero no existe ninguna prueba científica que apoye este escenario apocalíptico. Además, una enana marrón sería visible durante cientos o miles de años antes de que pudiera chocar contra nuestro planeta.

LAS PRIMERAS ENANAS MARRONES

Los astrónomos predijeron la existencia de las enanas marrones en los años sesenta a partir de lo que sabían sobre la formación de las estrellas y los planetas. Parecía que esa categoría intermedia debía existir, pero nadie fue capaz de encontrar un objeto semejante. La razón era que las enanas marrones son extremadamente tenues y emiten la mayor parte de su luz en el infrarrojo. Pero, por aquel entonces, la astronomía infrarroja se hallaba en sus albores y los astrónomos no disponían de los medios técnicos para detectarlas.

Entonces llegó 1995, un gran año para la astronomía. Fue aquel año cuando Michel Mayor y Didier Queloz detectaron 51 Pegasi b, el primer exoplaneta conocido en torno a una estrella ordinaria. Y también cuando se descubrió la primera enana marrón: Teide 1, identificada en famoso cúmulo estelar de las Pléyades por Rafael Rebolo López, María Rosa Zapatero-Osorio y Eduardo Martín Guerrero de Escalante, del Instituto de Astrofísica de Canarias. El objeto apareció en las imágenes en luz visible del telescopio de 0,80 metros del Observatorio del Teide. Era joven y aún conservaba cierto brillo como resultado de su formación. Los investigadores detectaron las huellas de varios átomos y moléculas en su atmósfera, incluido el litio. Las estrellas suelen quemar el litio nada más formarse, por lo que la observación de este elemento demostró que no se estaban produciendo procesos de fusión nuclear.

Dos meses después del hallazgo de Teide 1 se anunció el descubrimiento de una segunda enana marrón: Gliese 229B, perteneciente a un sistema binario. Un grupo de astrónomos del Instituto de Tecnología de California y de la Universidad Johns Hopkins vio por primera vez el objeto en una imagen infrarroja del Observatorio Palomar. Enseguida se dieron cuenta de que era extraño: tenía colores inusuales y su atmósfera contenía metano. La existencia de este compuesto requiere temperaturas muy bajas, ya que se trata de una molécula muy reactiva que, a temperaturas más altas, suele convertirse en monóxido de carbono. Las observaciones posteriores revelaron que aquella enana marrón era de un tamaño similar al de Júpiter (con un diámetro de casi 130.000 kilómetros) pero mucho más densa, con una masa 70 veces mayor.

Cuando comencé mi doctorado en el año 2000, ya se conocían otras enanas marrones, aunque no tantas. Trabajaba en la construcción de instrumentos infrarrojos y necesitaba un tema de investigación. Mi director de tesis estudiaba la formación de las estrellas, por lo que decidí buscar enanas marrones en las regiones de gestación estelar. A lo largo del doctorado acabé descubriendo un buen número de enanas marrones, incluidas algunas de las primeras con masas próximas a las de los planetas. Por entonces no teníamos ni idea de cómo se formaban y

Continúa en la página 46

Ni estrellas ni planetas

Muy abundantes en la galaxia, las enanas marrones son objetos tenues y compactos que se parecen a las estrellas en algunos aspectos y a los planetas en otros. Con masas típicas entre 13 y 80 veces la de Júpiter, ocupan su propia categoría. Varios hallazgos recientes sobre su proceso de formación, su atmósfera y otras propiedades han ayudado a caracterizar estos extraños astros.

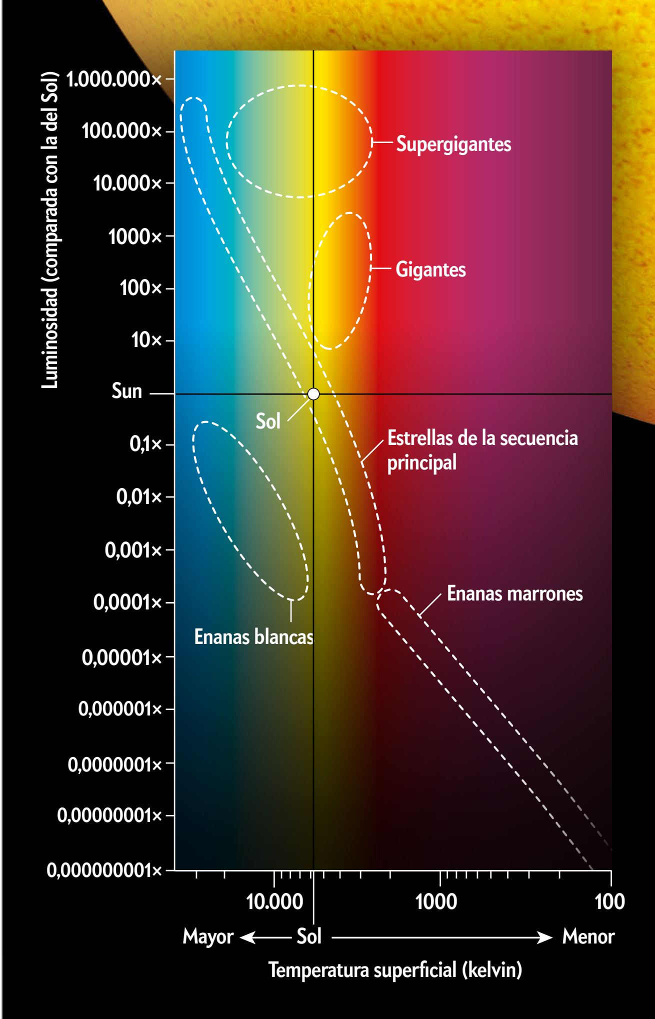


DIAGRAMA DE HERTZSPRUNG-RUSSELL

Este gráfico de la temperatura estelar frente al brillo es una herramienta clásica en astronomía para caracterizar los diversos tipos de estrellas. En él, las enanas marrones se sitúan en la parte inferior derecha: una categoría más fría y tenue que cualquier clase de estrella conocida.

SOL, ENANA AMARILLA
Radio: 696.000 kilómetros
Masa: 1050 veces la masa de Júpiter

PRÓXIMA CENTAURI, ENANA ROJA
Radio: 107.000 km
Masa: 130 veces la masa de Júpiter

PSO J318.5-22, ENANA MARRÓN
(Tipo espectral L)
Radio: 105.000 km
Masa: 8,3 veces la masa de Júpiter

WISE 0855, ENANA MARRÓN
(Tipo espectral Y)
Radio: 72.000 km
Masa: 3-10 veces la masa de Júpiter

JÚPITER, PLANETA GIGANTE GASEOSO
Radio: 71.500 km

MOTOR INTERNO

Las estrellas obtienen energía de la fusión del hidrógeno, pero las enanas marrones son demasiado pequeñas para sustentar este proceso y brillan debido al calor residual de su formación. Los planetas como Júpiter reflejan la luz de sus estrellas anfitrionas, además de emitir el calor de su formación.

ATMÓSFERA

Las estrellas, los planetas y las enanas marrones exhiben su propia dinámica atmosférica. Las enanas marrones pasan por varias etapas: al principio, su atmósfera se parece a la de una estrella enana roja. A medida que envejecen y se enfrían, pueden formarse nubes compuestas por minerales. Más tarde, esas nubes se hunden y la atmósfera superior pasa a asemejarse a la de un planeta gigante gaseoso.

Fusiona hidrógeno

Sin nubes en la atmósfera

Nubes de titanatos aluminatos de calcio

Nubes de hierro y silicatos de magnesio

Calor y densidad

Alto

Bajo

No fusiona hidrógeno

Monóxido de carbono gaseoso (*rojo*)

Nubes de sulfuros

Nubes de sales

Nubes de hielo de agua

No fusiona hidrógeno

Metano y amoníaco gaseoso (*azul*)

No fusiona hidrógeno

Las secciones no están dibujadas a escala

ENANA AMARILLA (ESTRELLA)

El Sol es una enana amarilla. Estas estrellas fusionan hidrógeno en helio durante unos 10.000 millones de años. Después se hinchan y se convierten en gigantes rojas: estrellas mucho mayores que fusionan el helio en carbono y otros elementos más pesados. Con el tiempo, se quedan sin combustible para la fusión nuclear. Sus capas exteriores de gas se desprenden y dan lugar a brillantes nebulosas planetarias, y su núcleo colapsa y se convierte en una enana blanca.

Evolución

10.000 millones de años

Gigante roja

Nebulosa planetaria

Enana blanca

ENANA ROJA (ESTRELLA)

Las enanas rojas, más tenues y frías que el Sol, son con diferencia el tipo de estrella más abundante en la Vía Láctea. También fusionan hidrógeno en helio, pero envejecen mucho más despacio que las enanas amarillas y pueden tardar un billón de años en agotar el hidrógeno. Cuando se quedan sin combustible, se convierten también en enanas blancas.

Evolución

1 billón de años

Enana blanca de helio

ENANA MARRÓN

Estos orbes no son estrellas, ya que su masa es demasiado pequeña y no pueden generar la presión necesaria para iniciar la fusión nuclear. Brillan con el calor residual de su formación y se van tornando más frías y tenues con el tiempo. Nunca morirán ni se transformarán en otra clase de astro: simplemente seguirán enfriándose y oscureciéndose por toda la eternidad.

Evolución

100 millones de años

GIGANTE GASEOSO (PLANETA)

En vez de surgir de la condensación de una nube de gas, como las estrellas y las enanas marrones, los planetas crecen a partir del disco de material sobrante que se forma en torno a una estrella incipiente. Júpiter y Saturno son los mayores planetas del sistema solar: gigantes gaseosos compuestos sobre todo por hidrógeno y helio. Al igual que en las enanas marrones, en su centro no se produce fusión nuclear.

RON MILLER (*objetos y atmósferas*) Y JEN CHRISTIANSEN (*diagrama H-R*)

Viene de la página 43
no sabíamos si existía un umbral inferior de masa, pero empezábamos a encontrar objetos cada vez menores.

Mi trabajo de tesis dio lugar a menos de 20 nuevos hallazgos, pero supusieron una contribución importante al número total de enanas marrones conocidas por entonces. Hoy se han encontrado muchísimas más con nuevos instrumentos. Los más prolíficos han sido el Sondeo de Todo el Cielo en 2 Micras (2MASS), un estudio en el infrarrojo realizado a principios de la década de 2000, y el Explorador Infrarrojo de Campo Amplio (WISE), un telescopio espacial lanzado en 2009. El cómputo actual de enanas marrones asciende a unas 3000. Sin embargo, quedan muchas más por descubrir: se calcula que, en la Vía Láctea, debería haber entre 25.000 millones y 100.000 millones de ellas.

ESCENARIOS DE FORMACIÓN

Las enanas marrones son el resultado menos masivo del proceso de formación estelar, por lo que ofrecen una oportunidad única para comprender los pasos básicos que conducen al nacimiento de las estrellas y los planetas. Las estrellas se forman en acumulaciones de polvo y gas (sobre todo hidrógeno molecular) llamadas nubes moleculares. Si una de esas nubes posee suficiente masa, la gravedad puede superar la presión interna que sostiene la nube y hacer que colapse sobre sí misma y forme una estrella. El colapso amplifica cualquier pequeña rotación existente en la nube, por la misma razón por la que un patinador sobre hielo comienza a girar más rápido cuando pega sus brazos al cuerpo. Esa rotación genera un disco circunestelar de materia en torno a la estrella naciente, el cual deviene un crisol para la formación de planetas.

Cuando se descubrieron las enanas marrones, los astrónomos supusieron que su proceso de formación podía ser similar al de las estrellas. Sin embargo, no lograban entender cómo era posible que la gravedad asociada a una masa tan pequeña superara la presión del gas e iniciara el colapso. Cuando estaba escribiendo este artículo, repasé algunas de las solicitudes que realicé durante los primeros años de mi carrera para obtener financiación o tiempo de observación en los telescopios. La mayoría de ellas tenían por objeto entender mejor el mecanismo de formación de las enanas marrones. Por aquella época coexistían varias ideas. Según algunas teorías, la formación de una estrella se interrumpiría antes de que hubiera alcanzado su masa final. ¿Quizás algún proceso expulsaba la enana marrón o consumía su entorno natal, dejando atrás una estrella en miniatura?

Otras hipótesis proponían una versión reducida de la formación de estrellas o una versión ampliada de la formación de planetas. Este es un buen ejemplo de cómo pueden usarse diversas teorías para hacer predicciones distintas y verificables. A medida que descubrimos la ubicuidad de los discos circunestelares alrededor de las enanas marrones; determinamos la distribución de masas de las estrellas y de las enanas marrones en diversos entornos; y estudiamos las órbitas de estas últimas en sistemas binarios, quedó claro que la mayoría de las enanas marrones parecen formarse como estrellas a escala reducida, solo que a partir de reservas de gas más pequeñas. Y el hecho de que las enanas marrones posean discos circunestelares plantea la atractiva posibilidad de que alberguen planetas. Aunque aún no estamos seguros de haber visto ninguno, es muy probable que se formen en esos discos, tal y como ocurre en torno a las estrellas. Muchos astrónomos esperan que, en los próximos años, se confirme por fin el hallazgo de mundos en órbita alrededor de enanas marrones.

Hace poco se descubrieron enanas marrones aisladas con masas similares a las de los planetas gigantes (inferiores a 13 veces la masa de Júpiter), lo que volvió a suscitar preguntas sobre su formación. ¿Podrían algunas de estas enanas marrones de masa planetaria haber surgido en los discos circunestelares de estrellas más masivas; es decir, haberse formado del mismo modo que los planetas?

A fin de explorar el mecanismo de formación de las enanas marrones con masas planetarias, mis colaboradores y yo propusimos un estudio con el telescopio espacial Hubble. Dado que se trata de un instrumento en órbita, evita la borrosidad y la absorción de la luz causadas por la atmósfera terrestre. Gracias a ello, en 2020 descubrimos un singular sistema de enanas marrones que apoyaba firmemente un mecanismo de formación estelar para los objetos con masas planetarias. El sistema, denominado Oph 98 AB, es muy joven en términos cósmicos, con apenas tres millones de años, y sus dos integrantes tienen 15 y 8 veces la masa de Júpiter. Esos objetos tan poco masivos se encuentran separados por una distancia 200 veces mayor que la que media entre la Tierra y el Sol. Debido a que Oph 98 A y B son tan livianas y se hallan tan alejadas, están ligadas por la energía gravitatoria más baja jamás observada en un sistema binario. Esa energía tan débil implica que los cuerpos tuvieron que nacer en su situación actual, en vez de surgir en otro lugar y emparejarse más tarde, lo que apunta a un mecanismo de formación similar al de las estrellas. Por otra parte, la escasa edad del sistema sugiere que los objetos de masa planetaria no tardarían más tiempo en formarse que las estrellas.

NUEVAS IDEAS

El estudio de las enanas marrones ha alcanzado una fase en la que podemos realizar mediciones más precisas y plantear preguntas más detalladas sobre estos objetos, aún misteriosos. Entre los descubrimientos recientes de mayor interés se hallan las enanas marrones más frías conocidas, las llamadas «enanas Y», con temperaturas comprendidas entre los 180 y los –20 grados Celsius. Aunque no son tan frías como Júpiter (–148 grados Celsius), las enanas Y nos han permitido realizar la primera comparación razonable entre las enanas marrones y las atmósferas de los planetas gigantes del sistema solar. Resultan difíciles de observar, puesto que son frías y muy tenues, y emiten luz sobre todo en el infrarrojo, a longitudes de onda de entre tres y cinco micras, donde la atmósfera terrestre complica las observaciones.

No obstante, mis colaboradores y yo hemos publicado los espectros de varias enanas Y, y hemos usado modelos teóricos para inferir la presencia de nubes de hielo de agua, así como de una considerable mezcla vertical en la atmósfera. En ese mismo intervalo de longitudes de onda, Júpiter emite su propia luz (en vez de limitarse a reflejar la del Sol) y también muestra una importante mezcla vertical. Nuestra esperanza es que el estudio de las enanas Y sirva para desentrañar qué propiedades de Júpiter se deben a su naturaleza planetaria (en otras palabras, al hecho de haberse formado en el disco circunestelar del Sol y estar constantemente iluminado por la luz solar) y cuáles podrían ser habituales en todos los objetos gaseosos fríos, ya sean planetas o enanas marrones. Hasta ahora, nuestros estudios muestran que una atmósfera muy dinámica tiende a ser una constante.

Estas ideas sobre la atmósfera de las enanas marrones han dado lugar a un nuevo subcampo: la exometeorología. Aunque las enanas marrones están demasiado lejos para que podamos examinar visualmente sus formaciones atmosféricas, estas se manifiestan mediante cambios de brillo. Cuando la rotación de la

enana marrón hace que una nube u otro elemento entre o salga de nuestro campo de visión, la luz procedente del objeto cambia. Los astrónomos han analizado las variaciones de brillo de las enanas marrones a lo largo de muchas rotaciones y han creado mapas de sus manchas y franjas, las cuales guardan un notable parecido con las familiares bandas y tormentas de los planetas gigantes de nuestro sistema solar [*véase* «El enigma de las bandas de Júpiter», por Simon Cabanes, Benjamin Favier y Michael Le Bars; Investigación y Ciencia, enero de 2018]. Se ha observado que el brillo de algunas enanas marrones cambia hasta en un 25 por ciento durante una rotación. Estos resultados nos permiten comprender mejor los procesos atmosféricos en general: hemos hallado que las enanas marrones con temperaturas a las que se dispersan las nubes exhiben grandes variaciones de brillo, y que los objetos jóvenes tienden a mostrar una mayor variabilidad.

Entre 100 y 500 millones de años después del nacimiento de una enana marrón, su atmósfera se enfría y se forman nubes de polvo hechas de minerales, como la enstatita y el cuarzo

También se han descubierto otras similitudes entre las enanas marrones y los gigantes gaseosos. Por ejemplo, ambos suelen exhibir fuertes campos magnéticos y auroras, como revelan las observaciones de radio asociadas a las partículas cargadas que giran en espiral en el campo magnético. Los campos magnéticos medidos en las enanas marrones son 1000 veces más intensos que el de Júpiter y 10.000 veces más que el de la Tierra. Es tentador imaginar qué aspecto tendría el cielo nocturno desde una enana marrón: dada la belleza de las auroras boreales de nuestro planeta, la vista seguramente sería espectacular.

Hace poco, la pregunta de un estudiante dio pie a otro proyecto para comparar las atmósferas de las enanas marrones con las de los planetas. Cuando enseño cursos de introducción a la astronomía, hablo sobre los planetas del sistema solar. Una curiosidad que explico es que la duración de un día joviano depende de cómo la midamos. Si cronometramos el movimiento de las formaciones atmosféricas visibles en la región ecuatorial de Júpiter, obtenemos un período de rotación unos cinco minutos menor que el medido a partir de las ondas de radio procedentes del planeta, las cuales dan información sobre la rotación interior. Un día un estudiante me preguntó por la causa de esa diferencia, y le contesté que tenía que ver con los fuertes vientos zonales que empujan las formaciones ecuatoriales de Júpiter. Los vientos de la Tierra se generan por la redistribución de la energía solar, pero no estamos seguros de hasta qué punto eso es aplicable a los de Júpiter.

Después de la clase seguí pensando en ello. Se han medido las emisiones de radio de las enanas marrones, las cuales responden al mismo mecanismo que las de Júpiter, de modo que es posible calcular un período de rotación interior. Y podemos emplear la estrategia de estudiar los cambios de brillo para obtener el período de rotación de la atmósfera. Así, se me ocurrió medir por primera vez la velocidad del viento en una enana marrón. La mejor candidata que teníamos para ensayar la técnica era una enana marrón de metano con emisión de radio confirmada. Para determinar la velocidad del viento, necesitábamos medir ambos períodos con una precisión de menos de 30 segundos. Mis colaboradores y yo presentamos una propuesta para estudiar las variaciones de brillo de la enana marrón con el telescopio espacial Spitzer, y también solicitamos usar la Red Muy Grande de Karl G. Jansky (VLA) de Nuevo México para establecer con mayor precisión el período a partir de la emisión de radio. Me sigue pareciendo un pequeño milagro que nuestras mediciones revelaran una diferencia de poco más de un minuto entre ambos períodos, lo que equivale a una velocidad del viento de 2300 kilómetros por hora. Nuestros hallazgos se publicaron el año pasado en la revista *Science*. Una velocidad del viento tan alta en una enana marrón aislada implica que los vientos atmosféricos no siempre surgen a partir de la redistribución de la energía solar, lo que deja abierta la cuestión de si los vientos de Júpiter son impulsados por el Sol o por otro mecanismo.

Hoy en día se siguen buscando más enanas marrones. Algunos estudios se centran en identificar grandes conjuntos de ellas mediante sondeos de todo el cielo, como 2MASS, WISE y el Telescopio de Sondeo Panorámico y Sistema de Respuesta Rápida (Pan-STARRS). La ciencia ciudadana también ha desempeñado un papel en la búsqueda a través de proyectos como Backyard Worlds, donde cualquiera puede examinar los datos de WISE en busca de signos de enanas marrones y otros objetos en movimiento. Esperamos que los próximos grandes sondeos con el Observatorio Vera C. Rubin (que debería entrar en funcionamiento a principios del año que viene) y el telescopio espacial Nancy Grace Roman (que se lanzará en 2025) sirvan para seguir completando nuestro censo de enanas marrones.

Por desgracia, no conseguimos financiación para el telescopio del Cerro Toco, por lo que no se construyó. Pero, cuando se lance el telescopio espacial James Webb, los astrónomos tendrán una visión sin precedentes de las enanas marrones en el infrarrojo, sin interferencias de la atmósfera terrestre. El primer ciclo de observaciones incluye programas para estudiar la química atmosférica de las enanas Y, la composición de las nubes de las enanas marrones polvorientas e incluso una búsqueda de sistemas planetarios alrededor de las enanas marrones. Sin duda se avecinan tiempos emocionantes para quienes estudiamos algunos de los objetos más ignorados del cosmos. IyC

PARA SABER MÁS

Young, low-mass brown dwarfs with mid-infrared excesses. Katelyn N. Allers et al. en *The Astrophysical Journal*, vol. 644, pág. 364, junio de 2006.
A review on substellar objects below the deuterium burning mass limit: Planets, brown dwarfs or what? José A. Caballero en *Geosciences*, vol. 8, pág. 362 y ss., septiembre de 2018.
A measurement of the wind speed on a brown dwarf. Katelyn N. Allers et al. en *Science*, vol. 368, págs. 169-172, abril de 2020.
A wide planetary-mass companion to a young low-mass brown dwarf in Ophiuchus. Clémence Fontanive et al. en *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 905, art. L14, diciembre de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Enanas marrones: Teide 1. Rafael Rebolo López en *IyC*, enero de 1996.
El descubrimiento de las enanas marrones. Gibor Basri en *IyC*, junio de 2000.
Origen de las enanas marrones. Subhanjoy Mohanty y Ray Jayawardhana en *IyC*, marzo de 2006.
Planetas ectópicos. Michael W. Werner y Michael A. Jura en *IyC*, agosto de 2009.

NEUROCIENCIA

EL ORIGEN DE LA TARTAN

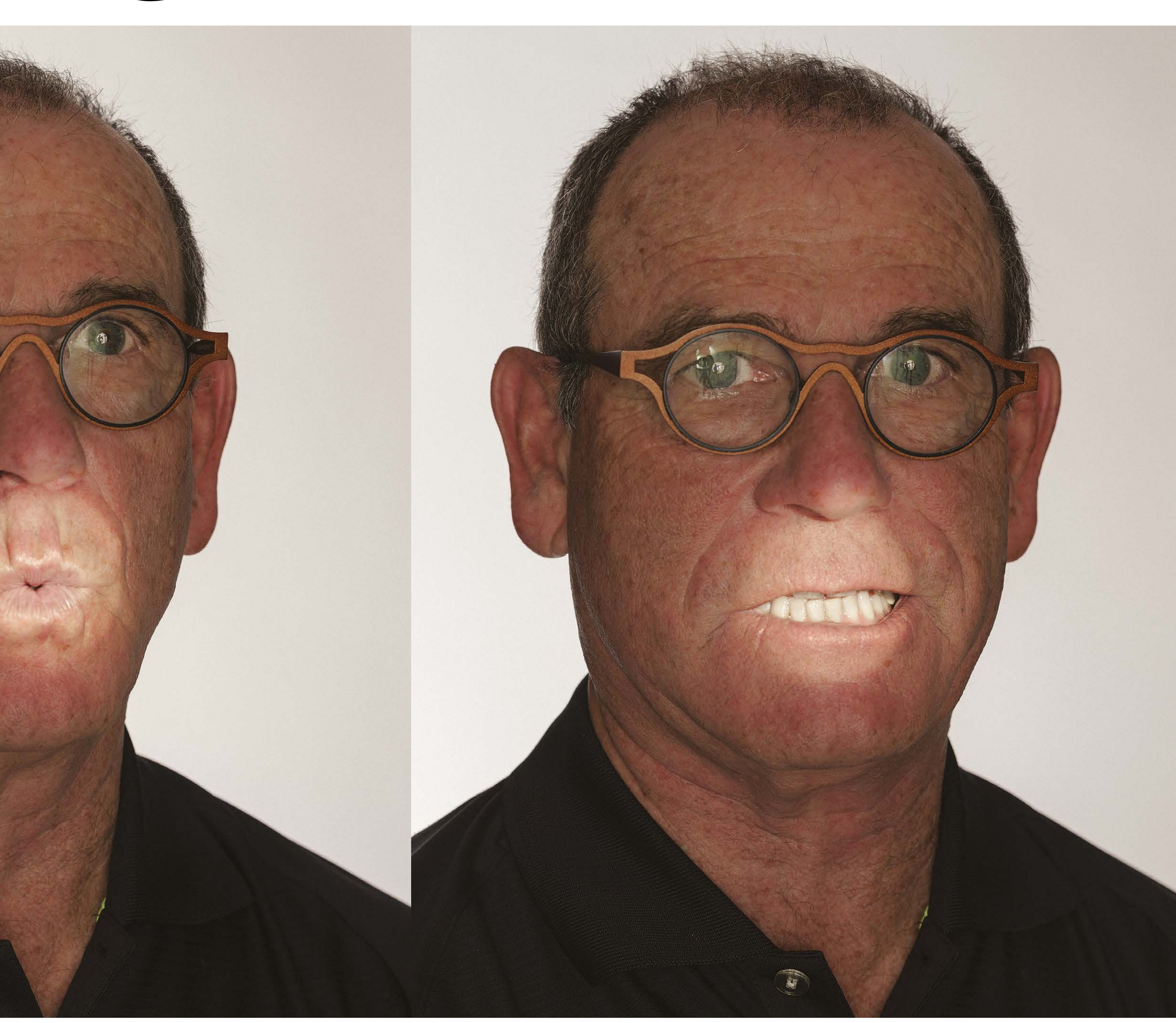


MUDEZ

Las conexiones neurológicas y los genes se encuentran detrás de este trastorno del habla, para el que se están investigando varios tratamientos innovadores

Lydia Denworth

Fotografías de Anthony Francis



LEE REEVES, que es tartamudo, vocaliza tres sonidos que le hacen trastabillar: «l» (*izquierda*), «w» (*centro*) y «st» (*derecha*). Reeves afirma que relajarse mientras forma los sonidos le ayuda a trabarse mucho menos.

Lydia Denworth es periodista científica y autora del libro *Friendship: The evolution, biology, and extraordinary power of life's fundamental bond* (W. W. Norton, 2020).



Lee Reeves siempre quiso ser veterinario. Una buena mañana de sábado, cuando aún iba al instituto en las afueras de Washington D.C., acudió a pedir trabajo a una clínica cercana a su domicilio. La recepcionista le dijo que el veterinario estaba demasiado ocupado para recibirlo, pero Reeves no se dio por vencido y se quedó esperando. Al cabo de tres horas y media, tras haber pasado consulta a todos los pacientes caninos y felinos, el veterinario salió y le preguntó en qué podía ayudarlo.

EN SÍNTESIS

En los últimos años se ha establecido que la tartamudez está asociada a pequeñas variaciones en la estructura y función del cerebro, y además posee un componente genético.

Esta constatación está inspirando nuevos tratamientos, desde fármacos que actúan sobre los receptores de dopamina hasta la estimulación cerebral con pequeñas corrientes eléctricas. La consigna es actuar cuanto antes.

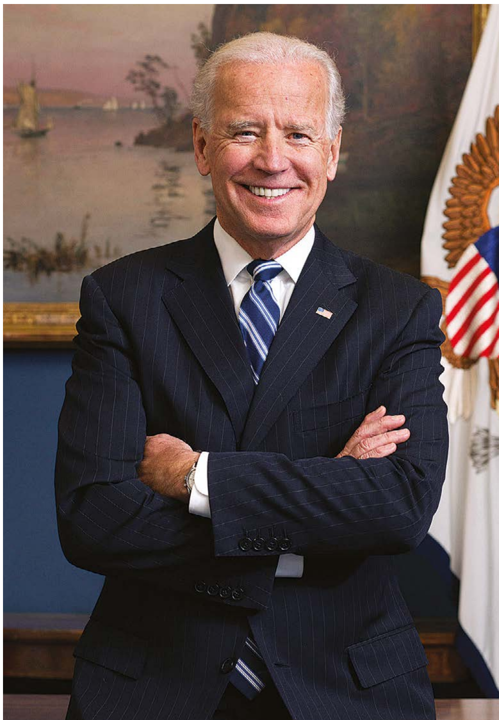
También se estudian otras incógnitas en torno a la tartamudez, como cuál es el papel que desempeñan los genes implicados o por qué en unas personas remite y en otras se cronifica.

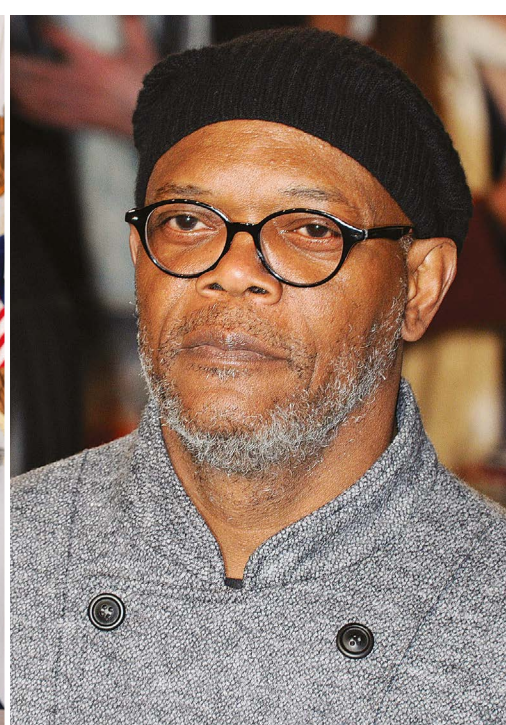
Reeves, tartamudo desde los tres años, tuvo problemas para responder. «Le dije como pude que quería trabajar allí y me preguntó cómo me llamaba», rememora. «No habría sido capaz de pronunciar mi nombre aunque mi vida hubiera dependido de ello.» El veterinario acabó por acercarle un papel y le pidió que anotara su nombre y número de teléfono, aunque le advirtió que no había ninguna vacante. «Aquella mañana me marché de esa clínica pensando que mi vida se había acabado», asegura Reeves. «Ya no es que nunca fuese a ser veterinario, es que ni siquiera me contratarían para limpiar las jaulas.»

Ha pasado más de medio siglo. Ahora Reeves tiene 72 años y se ha convertido en un activo defensor de las personas con trastornos del habla en EE.UU., pero aún recuerda como si fuera ayer la frustración y la vergüenza que sintió aquel día. El relato ilustra lo difícil que resulta ser tartamudo. Desde el punto de vista médico, la disfemia o tartamudez es una alteración de la fluidez verbal, aunque el esfuerzo físico y los efectos emocionales que suelen acompañarla han hecho que se atribuyera erróneamente a defectos en la lengua o la laringe, problemas cognitivos, traumas psicológicos o nerviosismo. También al hecho de forzar a los niños zurdos a usar la mano derecha o (la explicación más desafortunada de todas) a una mala crianza. Los psiquiatras freudianos creían que representaba un «con-

PA IMAGES Y ALAMY STOCK PHOTO; WHITE HOUSE PHOTO Y ALAMY STOCK PHOTO; MICHAEL MELIA Y ALAMY STOCK PHOTO; SHAWSHOTS Y ALAMY STOCK PHOTO; EVERETT COLLECTION Y ALAMY STOCK PHOTO; EVERETT COLLECTION Y ALAMY STOCK PHOTO *(de izquierda a derecha)*







flicto oral sádico», en tanto que los conductuales sostenían que etiquetar a un niño como tartamudo exacerbaría el problema. A los padres de Reeves les dijeron que no pensaran demasiado en su tartamudez: con el tiempo, desaparecería por sí sola.

Todos estos mitos e ideas erróneas han sido refutados. En los últimos veinte años, y sobre todo desde hace cinco o diez, un creciente número de investigaciones han establecido que la disfemia tiene una base biológica. En concreto, parece ser un trastorno del neurodesarrollo que surge en los primeros años de vida, cuando los niños están aprendiendo a hablar. Así le ha ocurrido a la mayoría de los más de 70 millones de personas de todo el mundo que tartamudean. En su cerebro se han descubierto pequeñas variaciones estructurales y funcionales que afectan a la fluidez del habla. Las personas tartamudas presentan diferencias en la conectividad neuronal, cambios en la integración de los sistemas vocal y nervioso motor, y alteraciones en la actividad de neurotransmisores esenciales como la dopamina.

También confluye un componente genético: se han identificado cuatro genes que aumentan drásticamente la probabilidad de padecer el trastorno. Del mismo modo que el parpadeo de una bombilla a veces no se debe a un defecto del filamento, sino a una avería en el cableado de la habitación, todas esas diferencias conducen a lo que los neurocientíficos describen como un problema en el conjunto del sistema encefálico.

Esos descubrimientos neurobiológicos ya están inspirando nuevos tratamientos. Un fármaco que actúa sobre la hiperactividad de la dopamina se halla en fase de ensayo clínico y otros están en desarrollo. Varios estudios recientes han mostrado los efectos positivos de la estimulación cerebral. Y dada la importancia de la neuroplasticidad en los niños pequeños, los especialistas aconsejan ahora lo opuesto a una actitud expectante [*véase* «Prevenir la tartamudez infantil», por Alicia Fernández-Zúñiga; Mente y Cerebro, n.º 46, 2011]. «Los hallazgos en el cerebro confirman que es preciso actuar cuanto antes», apunta J. Scott Yaruss, logopeda de la Universidad Estatal de Míchigan.

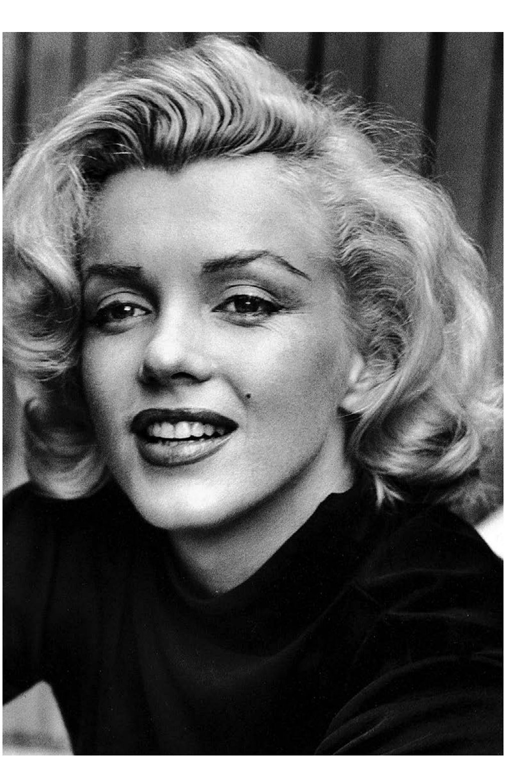
Ciertos aspectos de la disfemia siguen siendo un misterio. Afecta en torno al 5 por ciento de los niños, si bien hasta el 80 por ciento de ellos recuperan la fluidez. (Así que Reeves bien podría haber superado su tartamudez con el paso de los años.) A los científicos, los padres, los terapeutas y sobre todo los propios afectados les gustaría saber de qué depende que la tartamudez remita o se cronifique. El tratamiento ayuda, pero no parece ser el motivo. Los estudios a largo plazo con niños pueden arrojar luz sobre esta cuestión y empiezan a dar frutos. Y pese a que se han descubierto un puñado de genes vinculados a la disfemia, aún se desconoce su papel exacto en el trastorno.

A medida que van encajando más piezas, los investigadores y los terapeutas esperan que el reconocimiento de esas causas biológicas ayude a acabar con los prejuicios en torno a la disfemia. Aunque algunas personas tartamudas o con otras alteraciones del habla han llegado muy lejos (tanto el presidente de EE.UU. Joe Biden como Amanda Gorman, la poetisa que intervino en su investidura a principios de año, sufrieron problemas de tartamudeo), otros tienen vidas difíciles. Muchos están subempleados y padecen ansiedad social o trastornos del estado de ánimo. El psiquiatra y neurocientífico Gerald A. Maguire, de la Universidad de California en Riverside, es tartamudo y ha dedicado su carrera a la investigación de la dolencia y a la búsqueda de tratamientos farmacológicos. Su hermano, que también tartamudeaba, se quitó la vida. «Si logramos comprender los aspectos biológicos, abriremos la puerta a todo tipo de terapias y, con suerte, irá desapareciendo el estigma», opina Maguire.

EL REY JORGE VI DE INGLATERRA, el presidente de EE.UU. Joe Biden y los actores Samuel L. Jackson, Marilyn Monroe, James Earl Jones y Emily Blunt (*de izquierda a derecha*) tuvieron que lidiar con la tartamudez.

DE LOS GUIJARROS A LA NEUROIMAGEN

La tartamudez se conoce desde hace miles de años, y existe en todas las lenguas y culturas. Además de Biden, la han sufrido







muchos personajes célebres, como el orador griego Demóstenes, que se ponía guijarros bajo la lengua para practicar la dicción; el rey Jorge VI de Inglaterra, cuya heterodoxa terapia quedó inmortalizada en la película de 2010 *El discurso del rey*; y el actor Samuel L. Jackson, que pronunciaba palabras malsonantes para mejorar la fluidez. La disfemia difiere del balbuceo ocasional o frecuente. La repetición de palabras o el uso excesivo de expresiones como «um» o «eh» revelan deslices en la planificación verbal, mientras que las diferencias neurológicas que presentan las personas tartamudas trastocan la producción del habla a un nivel más básico. «Todos incurrimos en disfluencias, pero solo algunos tartamudean», destaca Yaruss.

Las personas disfémicas experimentan dificultades de tres tipos: prolongaciones de un sonido (*hommmmbre*), repeticiones de sílabas o sonidos (*ca-ca-casa*) y bloqueos en los que el hablante es incapaz de pronunciar sonido alguno. Si un niño sigue tartamudeando tras cumplir ocho años, probablemente lo hará de por vida.

Reeves describe la experiencia como una inesperada pérdida de control. «Sabes lo que quieres decir y cómo decirlo —las palabras, las frases, la estructura sintáctica, la inflexión—, pero de repente te atascas», explica. «No puedes proseguir ni volver atrás. Todos los músculos se paralizan.»

Los indicios del origen neurológico de la disfemia se remontan a 1928. El médico Samuel Orton y el logopeda Lee Travis especularon que el trastorno se debía a la competición entre los dos hemisferios cerebrales. «Iban bien encaminados», ratifica Maguire. Pero hubo que esperar a la aparición de las técnicas avanzadas de neuroimagen en los años noventa para descubrir diferencias neuronales en las personas tartamudas. En 1995, Maguire y sus colaboradores publicaron el primer estudio del trastorno realizado mediante tomografía por emisión de positrones y describieron descensos sistemáticos de la actividad neuronal en las áreas del lenguaje de cuatro personas disfémicas. Otros pequeños estudios pioneros hallaron aumentos de los niveles de dopamina en el cuerpo estriado, un componente primordial del circuito de recompensa del cerebro.

A partir de ese tipo de trabajos, se emprendieron pruebas con antipsicóticos que bloquean los receptores de dopamina. Se comprobó que mejoraban la fluidez de algunas personas, si bien existía el riesgo de sufrir efectos secundarios graves, como parkinsonismo. Con todo, muchos escépticos seguían convencidos de que la tartamudez no tenía nada que ver con el cerebro. Cuando Maguire expuso su teoría de que la disfemia era un trastorno cerebral en una conferencia científica celebrada a finales de los noventa, no fue muy bien recibida. «Prácticamente me abuchearon», lamenta.

Las últimas investigaciones con escáneres punteros y técnicas analíticas avanzadas demuestran que aquellos pioneros iban tras la pista correcta. En la mayoría de nosotros, el lenguaje está controlado sobre todo por el hemisferio izquierdo del cerebro. Los adultos disfémicos muestran menos actividad en las áreas de ese hemisferio asociadas a la producción del habla y más actividad en el hemisferio derecho, en comparación con los que no tartamudean. Por ejemplo, la neurocientífica cognitiva de la Universidad de Oxford Kate Watkins descubrió que una zona del hemisferio izquierdo cercana a las regiones del habla, la corteza premotora ventral, no se activaba cuando hablaban las personas tartamudas. Esa zona está justo sobre un importante fascículo (un haz de fibras) de sustancia blanca que conecta las áreas de control auditivo y motriz, donde Watkins y otros habían detectado diferencias estructurales en las personas disfémicas. La sustancia blanca está formada por axones, largas prolongaciones de las neuronas que transmiten los impulsos. «Son los cables que hacen posible la comunicación», señala Watkins.

Esa comunicación debe estar sincronizada a la perfección. A tal fin, los axones están recubiertos por una vaina aislante de mielina, una sustancia grasa que acelera la transmisión de los impulsos nerviosos. Los axones bien mielinizados de los fascículos suelen estar orientados en la misma dirección, como las fibras de los tallos del apio. Pero las imágenes ponderadas por difusión (un tipo de resonancia cerebral) revelan que los axones de las personas tartamudas seguramente se entrecruzan.

Además, el fluido interno y los neurotransmisores deben circular por los haces de sustancia blanca a lo largo de fibras paralelas, igual que el agua en el apio. En esas resonancias cerebrales, el flujo se cuantifica mediante un parámetro llamado anisotropía fraccional: cuanto mayor sea, más organizada estará la sustancia blanca [*véase* «Tras las vías nerviosas de la sustancia blanca», por Rainer Goebel y Jan Zimmermann; Mente y Cerebro, n.º 62, 2013]. Las personas tartamudas presentan una anisotropía fraccional más baja en ese fascículo. Watkins sospecha que eso significa que las áreas cerebrales unidas por la sustancia blanca a veces no reciben el mensaje y no se activan. (Algunas partes de otros fascículos de sustancia blanca, como el cuerpo calloso que conecta los hemisferios cerebrales, muestran una reducción similar de la integridad de la sustancia blanca en las personas disfémicas.)

Desde el punto de vista funcional, los tartamudos parecen tener deficiencias en el bucle corteza-ganglios basales-tálamo-corteza, que también sustenta la integración de las señales auditivas, verbales y motoras. Ese circuito conecta áreas superficiales de la corteza cerebral con estructuras más profundas (los ganglios basales, como el cuerpo estriado, y el tálamo). «El habla es uno de nuestros procesos motores más complejos», afirma la neurocientífica Soo-Eun Chang, de la Universidad de Míchigan. «Depende de que los circuitos neuronales y los músculos se coordinen en cuestión de milisegundos. Entre otras funciones, ese bucle controla el inicio preciso y oportuno de los patrones de movimiento.»

Aún no está claro por qué se produce la avería, pero incluso un defecto mínimo puede causar problemas de fluidez verbal. «Todo apunta a que los ganglios basales actúan a modo de centralita», comenta Maguire. «Si algo falla a lo largo de esa vía, aparecen los síntomas del tartamudeo.»

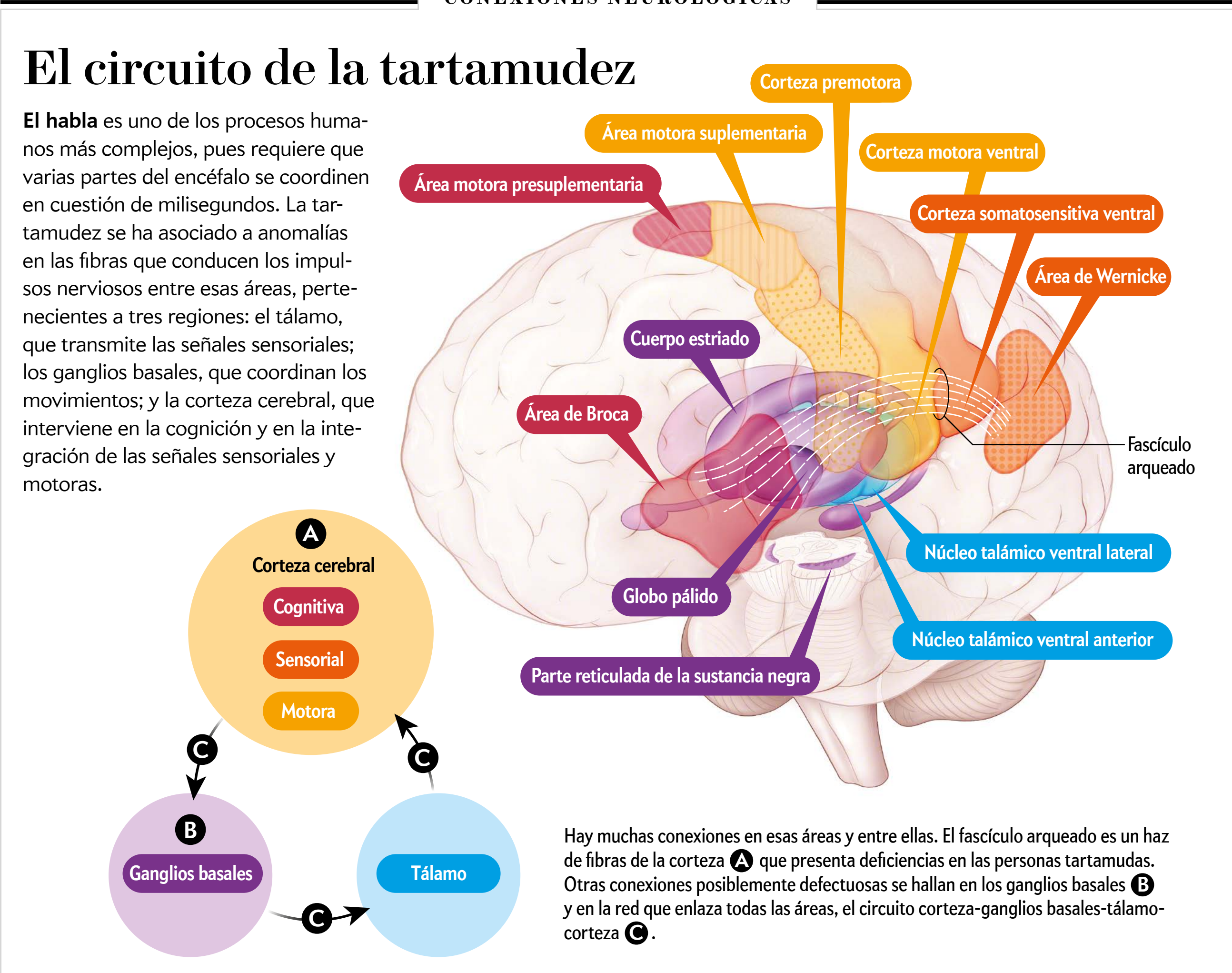
Ese tipo de diferencias podrían constituir la causa de la disfemia. O tal vez se trate de cambios compensatorios, efectos que aparecen cuando el cerebro intenta adaptarse al tartamudeo. Para distinguir entre causa y efecto, Chang estudia a más de 250 niños desde su tercer año de vida y durante al menos cuatro años; algunos se recuperan de la tartamudez y otros no.

En 2017, el equipo de Chang anunció que los niños disfémicos mostraban desde el principio una menor integridad de la sustancia blanca en los haces del hemisferio izquierdo que conectan las regiones auditivas y motoras. Pero, en los niños que superan el tartamudeo, esa integridad mejora con el tiempo: «aumenta y se normaliza en los que niños se recuperan, pero se estanca o incluso empeora en los que devienen crónicos», incide Chang.

La investigadora ha observado esa anomalía en el lado izquierdo del cerebro tanto en los niños como en los adultos que tartamudean. También ha descubierto (con más frecuencia en los adultos, al menos hasta el momento) un patrón de hiperactividad en el hemisferio derecho que presumiblemente sería un cambio adaptativo tardío. Según Chang, la pregunta del millón

El circuito de la tartamudez

El habla es uno de los procesos humanos más complejos, pues requiere que varias partes del encéfalo se coordinen en cuestión de milisegundos. La tartamudez se ha asociado a anomalías en las fibras que conducen los impulsos nerviosos entre esas áreas, pertenecientes a tres regiones: el tálamo, que transmite las señales sensoriales; los ganglios basales, que coordinan los movimientos; y la corteza cerebral, que interviene en la cognición y en la integración de las señales sensoriales y motoras.



Hay muchas conexiones en esas áreas y entre ellas. El fascículo arqueado es un haz de fibras de la corteza (A) que presenta deficiencias en las personas tartamudas. Otras conexiones posiblemente defectuosas se hallan en los ganglios basales (B) y en la red que enlaza todas las áreas, el circuito corteza-ganglios basales-tálamo-corteza (C).

FUENTE: «INVOLVEMENT OF THE CORTICO-BASAL GANGLIA-THALAMOCORTICAL LOOP IN DEVELOPMENTAL STUTTERING», SOO-EUN CHANG Y FRANK H. GUENTHER EN *FRONTIERS IN PSYCHOLOGY*, VOL. 10, ART. 3088, ENERO DE 2020 (*referencia del circuito*); BODY SCIENTIFIC (*ilustración*)

es si existen diferencias detectables desde el primer momento entre los niños que algún día dejarán de tartamudear y los que no lo harán nunca. «Sería crucial contar con un marcador objetivo precoz», añade, pues indicaría quien corre más riesgo de padecer tartamudez crónica.

TODO QUEDA EN FAMILIA

Gran parte de ese riesgo viene impuesto por el ADN familiar. Los estudios con gemelos y niños adoptados sugieren que los genes explican entre el 42 y el 85 por ciento del riesgo de tartamudear. Los gemelos comparten muchísimos más genes que los mellizos, y un trabajo halló que en el 63 por ciento de las parejas de gemelos con un integrante disfémico tartamudeaban ambos, frente al 19 por ciento en mellizos del mismo sexo. El riesgo restante obedecería a factores ambientales (un indicio de esa influencia no genética es que no siempre tartamudean ambos gemelos). Se desconoce cuáles son esos factores ambientales, que en algunos casos pueden sumarse a la predisposición genética.

Pero sí se han identificado algunos de los genes, gracias a la labor que inició hace veinte años el genetista Dennis Drayna, del Instituto Nacional de la Sordera y otros Trastornos de la Comunicación de EE.UU. Drayna viajó a Pakistán, donde son frecuentes las bodas entre primos, una práctica que puede reforzar el efecto de los genes en las familias. «No resultó difícil encontrar grandes familias con numerosos casos de tartamudez», indica Drayna.

En 2010, Drayna y sus colaboradores encontraron mutaciones vinculadas con la disfemia en tres genes: *GNPTAB*, un gen identificado anteriormente en un grave trastorno genético que no guarda relación con la tartamudez, *GNPTG* y *NAGPA*. Y entonces el especialista recibió una consulta a través de Internet, donde un hombre de Camerún le preguntaba sobre la prevalencia de la disfemia en su familia (33 de los 71 parientes que Drayna conocería después tartamudeaban). Eso le condujo a un cuarto gen: *AP4E1*. (El hallazgo de un quinto gen aún está pendiente de publicación.) En conjunto, esos genes explicarían a lo sumo el 20 o 25 por ciento de los casos, según Drayna. La alta prevalencia familiar del problema indica que debe haber más genes implicados, y un consorcio formado por 22 grupos de investigación y dirigido por científicos australianos los está buscando mediante un estudio de asociación del genoma completo con personas tartamudas.

Todos los genes descubiertos hasta la fecha tienen que ver con el tráfico intracelular, el transporte de moléculas en el seno de las células. En un estudio de 2019, Drayna y su equipo anunciaron que los ratones portadores de una mutación en el gen *GNPTAB* hacían pausas anormalmente largas en sus vocalizaciones, parecidas a las de la disfemia. Los roedores mostraban una carencia de astrocitos, un tipo de célula nerviosa abundante en los haces de sustancia blanca que conectan ambos hemisferios cerebrales. Es posible que esas mutaciones en genes relacio-

nados con los lisosomas, orgánulos celulares que intervienen en la eliminación de los productos de desecho, constituyan un eslabón entre la genética y la neurología de la disfemia.

ACABAR CON EL ESTIGMA

Que la tartamudez tenga un origen genético no significa que no se pueda tratar. Las nuevas investigaciones ya han inspirado terapias, y los enfoques farmacológicos se están refinando. Maguire y sus colaboradores opinan que la vía más prometedora es usar medicamentos que reduzcan la actividad de la dopamina en determinados circuitos cerebrales. Y eso es justo lo que hacen los antipsicóticos. Maguire ha probado algunos con éxito: la risperidona, la olanzapina y la lurasidona reducen la severidad de la disfemia, aunque aún no han sido aprobados para esa indicación por la Administración de Fármacos y Alimentos de EE.UU. Por desgracia, esos medicamentos también pueden causar efectos secundarios indeseados, como aumento de peso y alteraciones del movimiento. Pese a todo, hay quien ya los toma fuera de indicación, entre ellos el propio Maguire.

Ahora Maguire dirige un ensayo clínico aleatorizado más ambicioso con un fármaco llamado ecopipam, que actúa sobre un conjunto distinto de receptores de dopamina y también se está investigando para tratar el síndrome de Tourette [*véase* «Un tic diferente», por Alexander Münchau; Mente y Cerebro, n.º 63, 2013]. En un pequeño estudio piloto mejoró la fluidez y la calidad de vida de los probandos, sin ningún efecto secundario importante. Pero lo más probable es que cualquier tratamiento farmacológico contra la disfemia que obtenga la autorización de las agencias reguladoras no funcione con todo el mundo. «Creo que el siguiente paso será la medicina personalizada, averiguar qué le sucede a cada paciente», valora Maguire. «Estamos viendo que la tartamudez no es un único trastorno.»

La estimulación cerebral con pequeñas corrientes eléctricas también ofrece resultados alentadores. Watkins combinó la estimulación transcraneal no invasiva con estrategias de mejora de la fluidez verbal, como hacer que un grupo de personas lean al unísono o pedirles que hablen al compás de un metrónomo. Se ha demostrado que esas técnicas mejoran temporalmente la fluidez de las personas tartamudas, tal vez porque les proporcionan señales externas para iniciar el habla.

En un grupo que recibió el tratamiento combinado, Watkins comprobó que el porcentaje del discurso con sílabas repetidas o prolongadas, u otras características de la disfemia, disminuía del 12 al 8 por ciento. Por contra, en el grupo de referencia que no recibió la estimulación, ese porcentaje no varió. Aunque el impacto fue reducido, dado el pequeño tamaño del estudio y su breve duración (apenas cinco días), basta para indicar que iban por buen camino.

Combinar la logopedia con la estimulación cerebral podría reforzar el aprendizaje. «En cierto modo, consolidamos esa vía, haciéndola más eficaz gracias a la estimulación», explica Watkins. Por ahora, muchas personas tartamudas solo tienen a su disposición la logopedia tradicional, que suele basarse en practicar la producción verbal, pero también en aprender a comunicarse de forma efectiva pese al tartamudeo. La logopedia puede ser muy eficaz, pero sus resultados no siempre perduran: la mayoría de los pacientes recae en algún momento.

El reconocimiento de esa realidad y la sensibilización cultural han hecho que, en los últimos años, la terapia contra la disfemia pase de intentar erradicarla a facilitar su aceptación y gestión. «Una parte esencial tiene que ver con afrontar el problema», asegura Yaruss, que lo compara con el patinaje sobre hielo. La primera vez que uno se pone los patines y sale a la pista, avanza a trompicones y se siente como si se estuviera resbalando o cayendo. Pero a medida que aprende a tolerar esa sensación, gana en destreza. «Puedes decir: sé lo que debo hacer cuando me ocurra; superas los episodios de tartamudez con más pericia.»

Ese cambio de perspectiva es bienvenido. Catherine Moroney, de 54 años, es física e ingeniera informática en el Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA. «De niña no lograba hacerme entender», recuerda. Su fluidez mejoró mucho con la logopedia, pero solo temporalmente, porque acabó las sesiones justo en mitad de una exigente licenciatura de física. El estrés y la ansiedad no causan la disfemia, pero pueden empeorarla.

Moroney, cuyo tartamudeo es moderado pero fue más intenso en el pasado, tuvo la suerte de encontrar un jefe a quien solo le preocupaba la calidad de su trabajo, que consiste en estudiar las nubes y su papel en el sistema climático. Ahora toma olanzapina, uno de los antipsicóticos que estudió Maguire, fuera de indicación. «Hace mi día a día un poco más fácil.» Pero lo que le cambió la vida fue conocer a quienes se refiere como su «familia tartamuda». «Tal vez parezca raro, pero el lugar más bullicioso del mundo es una conferencia de tartamudos», afirma entre risas. «Nadie calla un instante. Es realmente liberador formar parte de la mayoría durante unos pocos días.»

Lee Reeves, expresidente del consejo de la Asociación Nacional de la Tartamudez de EE.UU. y uno de los primeros defensores del movimiento de autoayuda en este trastorno, no puede estar más de acuerdo. La logopedia le ayudó a mejorar su fluidez, pero el hecho de que su terapeuta fuese psicólogo clínico y tratara el estrés que le generaba la disfemia fue esencial para salir airoso. «Aprendí a tartamudear de un modo que me resultaba aceptable», explica.

El tartamudeo tampoco le impidió convertirse en veterinario. Tres semanas después de su visita a la clínica durante la adolescencia, el veterinario, que se llamaba Peter Malnati, contactó con él para ofrecerle un puesto. Trabajó allí durante el resto del instituto y la universidad, antes de emprender una carrera de cinco décadas como especialista en pequeños animales. Sus días de frustración y vergüenza son cosa del pasado. «Aún tartamudeo. Lo hice ayer y lo haré hoy», concluye Reeves. «Y espero hacerlo mañana, porque eso querrá decir que sigo vivo.» IyC

PARA SABER MÁS

Structural and functional abnormalities of the motor system in developmental stuttering. Kate E. Watkins et al. en *Brain*, vol. 131, págs. 50-59, enero de 2008.

White matter neuroanatomical differences in young children who stutter. Soo-Eun Chang et al. en *Brain*, vol. 138, págs. 694-711, marzo de 2015.

Transcranial direct current stimulation over left inferior frontal cortex improves speech fluency in adults who stutter. Jennifer Chesters, Riikka Möttönen y Kate E Watkins en *Brain*, vol. 141, págs. 1161-1171, abril de 2018.

Human *GNPTAB* stuttering mutations engineered into mice cause vocalization deficits and astrocyte pathology in the corpus callosum. Tae-Un Han et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 116, págs. 17515-17524, agosto de 2019.

The pharmacologic treatment of stuttering and its neuropharmacologic basis. Gerald A. Maguire et al. en *Frontiers in Neuroscience*, vol. 14, art. 158, marzo de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Tartamudez y logoterapia. Katrin Neumann en *MyC*, n.º 13, 2005.

Neurobiología de la tartamudez. Carles Escera y Sílvia Corbera en *MyC*, n.º 24, 2007.

Neurología de la tartamudez. Martin Sommer en *MyC*, n.º 66, 2014.

por Roberto García Roa

La comunicación animal en un mundo cambiante

El cambio climático podría alterar las señales comunicativas y afectar la conducta de algunos animales

El desgarrador aullido de un lémur, la coloración que adoptan los camaleones machos al encontrarse con un oponente o el cóctel de olores que las serpientes deben descifrar para encontrar pareja son solo algunos ejemplos de las múltiples formas de comunicación que existen en el reino animal.

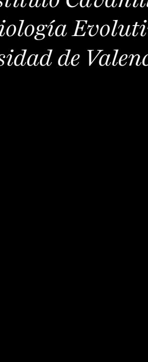
Tres elementos básicos de la comunicación son el individuo emisor, el receptor, y las señales transmitidas. Estas pueden ser acústicas, químicas, visuales (coloraciones y comportamientos) o combinaciones de ellas. Así ocurre en las aves del paraíso, cuyos machos ejecutan bailes y emiten cantos con el empeño de conquistar a las hembras. La señalización con fines reproductivos, como en este caso, puede ofrecer información sobre la calidad del individuo como pareja y progenitor, en especial sobre su estado de salud, madurez sexual o grado de parentesco.

Pero el emisor, la señal y el receptor no operan en el vacío, sino en un entorno con unas características particulares, como la temperatura, la intensidad de la luz o la humedad. ¿Cómo afecta a la comunicación la variación de estos factores ambientales?

Nuestro equipo de investigación está indagando en esta cuestión, de la que solo se conoce la punta del iceberg. En nuestros trabajos con lacértidos europeos (comúnmente conocidos como lagartijas) hemos observado que la frecuencia de algunas coloraciones en las poblaciones de una misma especie está condicionada por la temperatura estacional y la precipitación anual. En este grupo, y también en algunos invertebrados, como la mosca del vinagre (*Drosophila melanogaster*), hemos advertido que el aumento de la temperatura ambiental degrada con mayor rapidez las señales químicas y reduce la eficacia con la que machos y hembras detectan mutuamente su presencia.

Estudiar la ecología de la comunicación animal resulta clave para entender si las especies animales podrán adaptarse a fluctuaciones ambientales tan desafiantes como las asociadas al actual escenario de cambio climático.

—Roberto García Roa es investigador posdoctoral en el Instituto Cavanilles de Biodiversidad y Biología Evolutiva de la Universidad de Valencia



ILUSTRACIONES CORTESÍA DE ROBERTO GARCÍA ROA



FORMAS DE COMUNICACIÓN: La lagartija de las Pitiusas (*Podarcis pityusensis*) es una especie cuya coloración puede variar notablemente entre individuos y poblaciones, desde marrones hasta verdes y azules (1). Un lémur (*Indri indri*) con otros lémures cercanos en el parque natural de Ranomafana, en Madagascar (2). La serpiente *Tropidolaemus wagleri*, en Malasia, capta partículas químicas con la lengua para descifrar el entorno (3). La coloración de este camaleón pantera (*Furcifer pardalis*), en Madagascar, **informa a posibles oponentes sobre su capacidad competitiva** (4).

2



por María Rosa Massa-Esteve



María Rosa Massa-Esteve investiga en el Departamento de Matemáticas de la Universidad Politécnica de Cataluña.

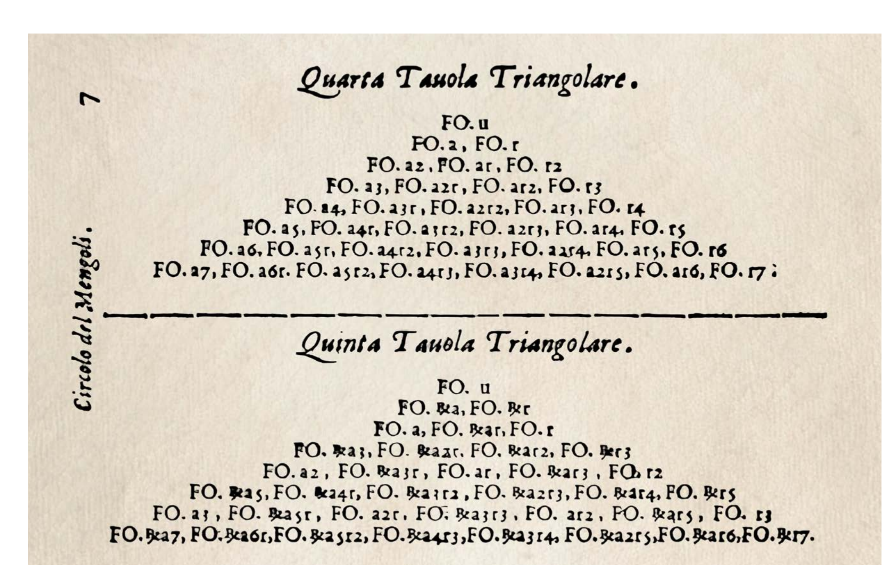
La transformación de la matemática en el siglo XVII

La introducción de notación simbólica cambió la manera de pensar y afrontar problemas en matemáticas: el caso de Pietro Mengoli y la cuadratura del círculo

La matemática del siglo XVII se desarrolló a través de la interacción de tres fuerzas fundamentales: la herencia clásica, ejemplificada por la recuperación directa de las obras de Euclides, Arquímedes y otros; la «revolución del infinito», debida a la extensión de la matemática al uso de algoritmos infinitos y al estudio de objetos geométricos de dimensión infinita; y la emergencia del álgebra y su aplicación a la resolución de problemas. Este desarrollo, que duró aproximadamente un siglo, conllevó dos innovaciones en la matemática: la creación de lo que hoy conocemos como geometría analítica y cálculo infinitesimal. Con el tiempo, estas disciplinas alcanzaron un poder excepcional, al establecer conexiones entre las operaciones algebraicas y las construcciones geométricas.

En este proceso, un paso decisivo para tratar curvas geométricas mediante expresiones algebraicas fue la publicación, en 1591, de *In artem analyticen isagoge* («Introducción al arte analítico»), de François Viète. En ella, el matemático francés utilizó símbolos para representar no solo las incógnitas, sino también las cantidades conocidas. Introdujo la «logística especiosa», un método de cálculo con «especies» (tipos o clases de elementos), de tal manera que los símbolos de su «arte analítico» (o álgebra) podían usarse para representar no solo números, sino también valores de cualquier magnitud abstracta. Viète concibió un método analítico-algebraico que facilitó resolver problemas de cualquier naturaleza, ya fuese numérica o geométrica, usando como herramienta el nuevo lenguaje simbólico.

Gracias a la circulación de las obras de Viète, de Fermat y, sobre todo, a *La géométrie* de Descartes (1637), el lenguaje simbólico y los procedimientos analítico-algebraicos se aplicaron durante el siglo XVII a diferentes campos. Dichos procedimientos usaban un lenguaje nuevo de símbolos y técnicas. No se trataba solo de una notación, sino de una herramienta esencial que provocó el cambio de un pensamiento casi exclusivamente geométrico a uno cada vez más algebraico, lo que permitió diversas aproximaciones y métodos para afrontar un mismo problema. En concreto, varios autores del siglo XVII, como Leibniz, John Wallis o el italiano Pietro Mengoli, emplearon procedimientos analítico-algebraicos para aproximar la cuadratura del círculo.



TABLAS TRIANGULARES publicadas por Pietro Mengoli en su obra *Circolo*, de 1672. Inspiradas en el triángulo combinatorio, cada elemento es una expresión algebraica asociada a una figura geométrica.

Un buen ejemplo nos lo proporciona la obra pionera *Geometriae speciosae elementa*, publicada por Mengoli en 1659. Se trata de un texto de 472 páginas sobre matemáticas puras, cuyo título («Elementos de geometría especiosa») ya indica el uso del método analítico y del lenguaje simbólico, sobre todo en geometría. Mengoli creó así una «geometría especiosa» basada en el «álgebra especiosa» de Viète, ya que empleaba un lenguaje que usaba símbolos para representar todo tipo de magnitudes abstractas.

Mengoli inventó una nueva forma de escribir y calcular sumas finitas de potencias y productos de potencias. No les dio valores ni los escribió utilizando el signo + y los puntos suspensivos, sino que creó una construcción simbólica innovadora y eficaz que le permitiría calcular estas sumas (que él llamaba «especies») y operar con ellas. Por ejemplo, la notación *O.a* expresaba el sumatorio de los primeros $t - 1$ números naturales.

El italiano dispuso esos sumatorios en tablas triangulares inspiradas en el triángulo combinatorio. Por un lado, usó el triángulo combinatorio y el lenguaje simbólico para crear otras tablas con expresiones algebraicas, estableciendo claramente sus leyes de formación. Por otro,

empleó las relaciones entre estas nuevas expresiones algebraicas y los coeficientes binomiales para, por ejemplo, calcular la suma de las m-ésimas potencias de los primeros $t - 1$ números naturales.

Las fórmulas de las sumas de cuadrados, cubos y potencias superiores de números naturales fueron clave para el desarrollo del cálculo integral en el siglo XVII. Mengoli llegó a esos resultados independientemente de Fermat y Pascal. Al igual que ellos, encontró una regla para obtener la suma de las potencias m-ésimas. Sin embargo, además de enunciar la regla, Mengoli la demostró y la utilizó para obtener dichos valores expresando todos sus cálculos en lenguaje simbólico.

Su idea era que las letras podían representar no solo números dados o cantidades desconocidas, sino también variables; es decir, cantidades determinables pero indeterminadas. Por ejemplo, las sumas anteriores son números indeterminados, pero determinables toda vez que conocemos el valor de t. Al asignar diferentes valores a t, Mengoli introdujo explícitamente la idea de variable, una noción nueva en aquella época, calculando las «cuasirrazones» (hoy conocidas como límites) de las razones de sumatorios y las potencias de t. Mengoli construyó la teoría de las «cuasiproporciones» tomando como modelo la teoría euclídea de las proporciones, lo que constituyó un episodio clave en el uso del infinito y se revelaría como una exitosa herramienta en su estudio de las cuadraturas y los logaritmos.

Con todo, el objetivo principal de Mengoli era el cálculo de la cuadratura del círculo. En lugar de limitarse a aproximarla, creó un nuevo y fructífero método algebraico que implicaba el cálculo de innumerables cuadraturas. Comenzó en el elemento sexto de su *Geometria*, titulado *De innumerabilibus quadraturis*, a calcular las cuadraturas entre 0 y 1 de figuras geométricas determinadas, en notación moderna, por la expresión

$$y = x^n(1 - x)^{m-n},$$

donde m y n son números naturales.

Mengoli definió su propio sistema de coordenadas y describió las figuras que deseaba cuadrar como «extendidas por sus ordenadas». Denotó esas figuras (a las que se refirió como «formas») mediante una expresión algebraica escrita como

$$FO.a^n r^{m-n},$$

donde $FO.$ denota la forma, a la abscisa (x), y r el residuo ($1 - x$). Llamó a esta expresión «forma de todos los productos de n abscisas y ($m - n$) residuos».

Su enfoque fue profundamente original, ya que usó estos nuevos símbolos, que había asociado a las figuras geométricas, para los cálculos algebraicos. En efecto, Mengoli tuvo que asegurarse de que cada una de las expresiones algebraicas de la tabla triangular, que eran nuevos objetos algebraicos, pudiera asociarse a una curva geométrica definida. Demostró, para una medida dada, cómo construir la ordenada a partir de la forma algebraica correspondiente utilizando la composición de razones. Y de este modo estableció, seguramente por primera vez, una relación de identificación entre los objetos algebraicos y las figuras geométricas, lo que le permitió tratar estas últimas mediante sus expresiones algebraicas.

Mengoli presentó estas figuras geométricas en una tabla triangular infinita, la *tabula formosa*, o «tabla de formas», identificando explícitamente las figuras geométricas con los valores de sus áreas (cuadraturas). Estos también se mostraron en otra tabla triangular, hoy llamada «triángulo armónico», como términos homólogos.

Más tarde, en su obra *Circolo*, publicada en 1672, Mengoli calculó por interpolación las cuadraturas entre 0 y 1 de las figuras geométricas mixtas determinadas por

$$y = x^{n/2}(1 - x)^{(m-n)/2},$$

donde m y n vuelven a ser números naturales. Nótese que, para los valores $m = 2$ y $n = 1$, la figura resultante corresponde a un semicírculo de diámetro unidad.

En primer lugar, describió estas figuras geométricas interpoladas y volvió a mostrarlas en una tabla triangular interpolada infinita. Luego obtuvo una tabla triangular interpolada infinita de los valores de sus cuadraturas, que es nada menos que el triángulo armónico interpolado, y por homología identificó los valores de ambas tablas. Cabe destacar que en la *Geometria* solo hay tres dibujos de las figuras geométricas, mientras que en el *Circolo* no incluyó ninguno.

Con la ayuda de las propiedades del triángulo combinatorio, Mengoli pudo rellenar el triángulo armónico interpolado, excepto un número desconocido, a. Dicho número estaba relacionado con la cuadratura del círculo ($1/2a = \pi/8$) y se expresaba mediante un producto infinito. Calculando con logaritmos, Mengoli logró aproximar el número π hasta once cifras decimales.

En 1676, Leibniz, que citaba a Mengoli como matemático con el que le gustaría colaborar, escribió unos extractos del *Circolo*. En ellos construyó una tabla triangular de ordenadas donde Mengoli había construido la tabla triangular de las figuras geométricas, y dibujó una figura geométrica para justificar los valores de las cuadraturas. Esta transformación de la matemática se estabilizó a principios del siglo XVIII y, como consecuencia, los procedimientos algebraicos se emplearon habitualmente para resolver problemas en otros campos, como mecánica, óptica o astronomía.

La fusión del álgebra y la geometría en la práctica y el pensamiento científicos del siglo XVII contiene aún muchos aspectos dignos de estudio: la búsqueda de nuevos métodos analíticos para resolver problemas recreando los métodos clásicos; las líneas divisorias, todavía fluctuantes en cuanto a terminología y metodología, de la aritmética, el álgebra, el análisis y la geometría; la superación de algunos obstáculos para hacer compatibles el álgebra y la geometría; y la introducción y el aumento de métodos algebraicos en otros campos relacionados con el infinito, los logaritmos, la trigonometría, lo que hoy llamamos teoría de números, las curvas y, en particular, las secciones cónicas.

El trabajo de Mengoli muestra que el uso del infinito y de su método analítico-algebraico permitió reformular y solucionar problemas aritméticos o geométricos, en términos de un camino más eficiente, fácil y sin demostraciones indirectas. IyC

PARA SABER MÁS

Philosophy of mathematics and mathematical practice in the seventeenth century. Paolo Mancosu. Oxford University Press, 1996.

Euler's beta integral in Pietro Mengoli's works. M. Rosa Massa-Esteve y Amadeu Delshams en *Archive for History of Exact Sciences*, vol. 63, págs. 325-356, 2009.

Pluralité de l'algèbre à la Renaissance. Dirigido por Sabine Rommevaux, Maryvonne Spiesser y M. Rosa Massa-Esteve. Honoré Champions, 2012.

Seventeenth-century indivisibles revisited. Dirigido por Vincent Jullien. Birkhäuser, 2015.

Mengoli's mathematical ideas in Leibniz's excerpts. M. Rosa Massa-Esteve en *British Society for the History of Mathematics Butlletin*, vol. 32, págs. 40-60, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

La secreta historia espiritual del cálculo. Amir Alexander en *IyC*, junio de 2014.

El nuevo lenguaje de las matemáticas. Daniel S. Silver en *IyC*, febrero de 2019.

por Ricardo Baeza-Yates

Ricardo Baeza-Yates es director de investigación del Instituto de Inteligencia Artificial Experiencial de la Universidad Northeastern, en Estados Unidos; de la Universidad Pompeu Fabra, en Cataluña; y de la Universidad de Chile. Es experto en tecnologías de búsqueda, ciencia de datos e inteligencia artificial responsable.



Los sesgos de los algoritmos

Cuáles son sus causas y qué podemos hacer para mitigarlos

Con la creciente automatización de la sociedad, buena parte de nuestras acciones y decisiones cotidianas están dirigidas e influenciadas por los algoritmos, un conjunto de operaciones informáticas diseñadas para ahorrarnos tiempo y facilitarnos la vida. Sin embargo, los algoritmos presentan sesgos, un problema cada día más preocupante, más aún si se tiene en cuenta que a menudo toman decisiones de forma automatizada.

Pero antes de hablar sobre los algoritmos, reflexionemos sobre los sesgos en sí mismos, que pueden ser de tres tipos. Uno es el sesgo de medición, una desviación sistemática de una medida con respecto a un valor de referencia. Un ejemplo sería una balanza que, a causa de algún fallo de funcionamiento, siempre midiera un kilo de más (o de menos). Otro tipo de sesgo es el cultural o social, como el de género o raza. Y, por último, están los sesgos cognitivos de cada persona, que muchas veces se deben a prejuicios subjetivos. Un ejemplo es el sesgo de confirmación: leemos algo que está alineado con nuestras creencias y lo aceptamos como cierto.

Los algoritmos incorporan estos sesgos y generan otros totalmente nuevos. La causa más importante de sesgos en ellos radica en los datos que se han empleado para crearlos. La mayoría de los datos incluyen sesgos culturales o de medición. Si no somos conscientes de estos sesgos, los resultados que nos ofrezcan los algoritmos los reflejarán. Por este motivo es importante eliminarlos o mitigarlos. Por ejemplo, si en los datos hay más hombres que mujeres, podemos eliminar aleatoriamente algunos casos masculinos para que la representación de cada género sea equilibrada.

La segunda causa de los sesgos nace de la interacción de los seres humanos con el algoritmo. Esta depende de cómo se comunican los resultados en una pantalla o como se usa la interfaz. Los clics, por ejemplo, muchas veces forman un ciclo de realimentación continua, y se utilizan para personalizar la experiencia del usuario, lo que genera sesgos de exposición, popularidad o posición, por mencionar algunos.

La tercera causa es la más compleja de todas. Se trata de sesgos que proceden del propio algoritmo. Dependiendo del objetivo de este, es posible que amplifique los sesgos de los datos o que incluso agregue otros sesgos. Incluso hay pruebas recientes de que los diseñadores y programadores del algoritmo pueden transferir a este sus propios sesgos cognitivos.

Los sesgos de los algoritmos son especialmente peligrosos en los sistemas de aprendizaje automático supervisado, un tipo de inteligencia artificial en el que, a partir de los datos, se entrena un modelo de aprendizaje que luego se usa, entre otras cosas, para predecir valores o identificar objetos. Cuando estos sistemas «inteligentes» con sesgos se usan para automatizar decisiones, pueden discriminar a ciertos grupos de personas o poblaciones. Las noticias sobre este tipo de problemas son cada vez más frecuentes. Así, hay algoritmos que predicen que los crímenes se producirán con más frecuencia en los barrios vulnerables de una ciudad; otros diseñados para la selección de personal discriminan a las mujeres; o, al predecir la calificación de estudiantes, desfavorecen a los más pobres; los hay que apoyan sentencias judiciales que discriminan a minorías; y los algoritmos de traducción de textos perpetúan a menudo estereotipos o prejuicios.



¿Qué podemos hacer frente a los sesgos de los algoritmos? En el caso de la discriminación laboral, nuestro grupo de investigación en Barcelona ha creado un algoritmo que reordena el resultado de una búsqueda de candidatos de modo que en los primeros lugares aparezca un mayor número de mujeres. Por supuesto, si hay menos mujeres que hombres, el sesgo no puede eliminarse del todo, y siempre deberá sopesarse si mejoran las decisiones humanas. De hecho, según un estudio, incluso algoritmos más racistas que los jueces pueden ser más justos que ellos, pues, al no depender del estado de ánimo, siempre toman la misma decisión. En cuanto a los sesgos de interacción, las personas escogen en los buscadores los primeros resultados, lo que puede generar sesgos de popularidad que van mermando la calidad de la búsqueda. Para mitigar ese efecto, todos los buscadores calibran el número de clics en las primeras posiciones para no autoengañarse (es decir, los clics en los resultados inferiores tienen más valor que los de los superiores).

Actualmente se están desarrollando herramientas para mejorar la detección y la mitigación de los sesgos, como las metodologías de *software* que permiten un desarrollo responsable y ético de este. También se están introduciendo normas para asegurar que los algoritmos sean transparentes y ofrezcan explicaciones. El Reglamento General de Protección de Datos de la Unión Europea en el artículo 22 ya recoge este aspecto y obliga a pedir el consentimiento del usuario o la posibilidad de que este impugne el resultado del algoritmo y reciba explicaciones al respecto. Y en la propuesta de regulación de la IA de la Unión Europea, se prohíben las prácticas que causen daño físico o psicológico. Creo que en el futuro los sistemas equitativos serán los más utilizados, ya que se preocupan del bienestar de todos, de modo semejante a como sucede con la comida orgánica o el salario justo. IyC

por Jaime Martínez Valderrama

Jaime Martínez Valderrama, investigador del Instituto Multidisciplinar para el Estudio del Medio de la Universidad de Alicante, es experto en desertificación y modelos de simulación.



El ocaso del omnívoro

La simplificación de la dieta humana está amenazando nuestra salud y la del planeta

En su brillante libro *El dilema del omnívoro*, Michael Pollan incide en la disyuntiva a la que se enfrenta la especie humana cuando elige qué comer. Ser omnívoros significa dedicar una enorme cantidad de energía y tiempo en descartar o dosificar aquellos alimentos que nos pueden sentar mal, y seleccionar los que nos convienen. Este dilema se acentúa al observar los coloridos estantes de los supermercados, repletos de una diversidad de alimentos cada vez mayor.

Sin embargo, si lo analizamos en detalle, buena parte de este surtido resulta ser la combinación, más o menos imaginativa, de unos pocos ingredientes, entre los que predominan el azúcar, los hidratos de carbono del maíz, el trigo y el arroz, y tres tipos de carne (cerdo, pollo y ternera). El número de especies y variedades vegetales y animales que utiliza la especie humana para alimentarse está disminuyendo vertiginosamente.

Según la FAO, los tres cereales mencionados proporcionan la mitad de las calorías de origen vegetal que ingerimos. Y, junto con la soja, su cultivo ocupa la mitad de la superficie agrícola; la otra mitad la comparten otros 152 cultivos. Diversos estudios corroboran la dramática simplificación de nuestras dietas. El 90 por ciento de las calorías de origen vegetal proceden solo de 82 especies agrícolas, de las 12.650 que hay en el planeta. El siglo pasado perdimos el 75 por ciento de la diversidad de cultivos: en China, desaparecieron en treinta años un 90 por ciento de las 10.000 variedades de trigo cultivadas; en México, se esfumaron un 80 por ciento de las de maíz; y en Estados Unidos, dejaron de cultivarse entre el 80 y el 95 por ciento de las de manzana, col, maíz, guisante y tomate.

Asimismo, se están registrando descensos en la diversidad de razas ganaderas, con un ritmo de extinción de una al mes. En Europa y Norteamérica, por ejemplo, la vaca frisona (la de manchas negras y blancas) representa, respectivamente, el 60 y el 90 por ciento de todo el ganado lechero. En España, de las 108 especies de rumiantes (vacas, ovejas y cabras) incluidas en el Catálogo Oficial de Razas de Ganado, 86 están en peligro de extinción.

Si tener que elegir los alimentos supone un auténtico quebradero de cabeza, como sugiere Pollan, una simplificación de la dieta podría parecernos ventajosa. ¿Por qué no hacemos como el koala, que desayuna, come, merienda y cena hojas de eucalipto todos los días? ¿Y si desaparecieran los eucaliptos? Aunque sea un suceso improbable, el koala se extinguiría. O pensemos en la hambruna de Irlanda, que redujo en un cuarto su población al confiar su alimentación en una sola variedad de patata arrasada por un hongo en 1845.



GETTY IMAGES/NOPPARAT PROMTHA/ISTOCK

Así pues, disponer de una amplia oferta de alimentos atenúa las posibilidades de colapso. De hecho, nuestra especie ha logrado colonizar cada rincón del planeta gracias a la versatilidad de su dieta. Cada vez más estudios demuestran que, cuanto mayor es la diversidad de lo que cultivamos (o criamos), más resiliente y seguro es nuestro sistema alimentario.

La homogeneización de la dieta ha sido fruto de la globalización de los hábitos alimentarios occidentales y de la Revolución Verde, que modernizó la agricultura con el uso de unas pocas variedades muy productivas, abonos, riego y plaguicidas, con el fin de aumentar las cosechas y espantar el fantasma del hambre.

Pero este modelo agroindustrial, en perpetuo crecimiento, está dañando la salud humana y el planeta. Al favorecer las especies y variedades más rentables, ricas en almidón y grasas, ha marginado otras menos productivas pero que aportan, por ejemplo, micronutrientes esenciales como minerales, vitaminas y antioxidantes. Como consecuencia, las alteraciones relacionadas con la dieta se han convertido en el primer factor de riesgo de morbilidad y mortalidad en el mundo, con más de 2000 millones de personas que sufren obesidad y otros tantos que padecen graves carencias de micronutrientes.

El ritmo frenético de crecimiento está también perjudicando los ecosistemas, cada vez más deteriorados y con los recursos más mermados. El Fondo Mundial para la Naturaleza ha calculado que, en 2021, hemos tardado 210 días en agotar los recursos que el planeta regenera en un año, y hemos desmantelado servicios ambientales esenciales, como el reciclaje de nutrientes, la producción de oxígeno, la fijación de carbono o la conservación de la humedad.

Si queremos vivir más y mejor, necesitamos un nuevo modelo, uno que sea capaz de dar alimento pero no a costa de destruir el planeta. Debe ayudarnos también a lidiar con el despoblamiento del medio rural, el cambio climático, el agotamiento de los recursos hídricos y los problemas de salud. El nuevo modelo debe sostenerse en toda esa red de pequeños productores, que son los guardianes de un legado agrobiológico y de conocimiento inconmensurable. Necesitamos que les merezca la pena seguir siendo agricultores. La apuesta por una agricultura más diversa, no tan centrada en criterios productivos, ayudaría, en definitiva, a una transición agraria que se antoja necesaria y urgente. IyC

Miguel Á. Vázquez-Mozo es físico teórico en el Departamento de Física Fundamental de la Universidad de Salamanca.



FÍSICA

EL SOÑADOR DE LA TEORÍA FINAL

Steven Weinberg no solo fue un gigante de la física teórica. Fue también un educador de primera línea y un referente cultural

Miguel Á. Vázquez-Mozo



O ÚNICO QUE QUIERO SABER ES POR QUÉ LAS COSAS SON COMO SON.» Con estas palabras respondía Steven Weinberg al periodista Bill Moyers cuando, en 1988, este le preguntó qué era lo que quería comprender del universo. Esa curiosidad por conocer la razón última de las cosas fue una constante en toda la carrera científica de Weinberg, uno de los padres del modelo estándar de la física de partículas y personalidad señera de la física teórica de la segunda mitad del siglo xx.

Tristemente, el físico neoyorkino nos abandonó el pasado 23 de julio a la edad de 88 años. Al liderazgo que durante décadas mantuvo dentro de la física de altas energías se sumó su papel como educador, divulgador y firme defensor de la cultura científica. Estas facetas dejaron una huella indeleble no solo en la física como disciplina, sino en generaciones de investigadores y en la cultura en general.

Receptor del premio Nobel de física de 1979 por su contribución clave a la formulación de la teoría electrodébil, Weinberg pasará también a la historia por sus aportes de primer orden a la teoría cuántica de campos, la física de partículas, la gravitación y la cosmología. Pero su legado no queda ahí. De entre los grandes físicos contemporáneos, pocos han articulado y defendido sus ideas sobre la naturaleza y la ciencia con la extensión y brillantez con que Weinberg lo hizo. Esto justifica hablar de *su* filosofía de la naturaleza, cuyo punto de partida era que las leyes de la naturaleza son reales: no en un sentido convencional, como las reglas de cualquier deporte o juego, sino de la misma manera en que son reales una piedra o un libro. Esta postura encierra profundas implicaciones, ya que comporta que la actividad del científico tiene un referente externo y que, por tanto, puede describirse como una búsqueda de verdades universales sobre la naturaleza.

Como cabía esperar, el uso de términos como *real* o *verdad* fue causa de controversia con filósofos de la ciencia, para quienes estas categorías tenían una excesiva carga epistemológica. Frente a ellos, Weinberg reivindicó, no sin polémica, la independencia de la ciencia con respecto a la filosofía, disciplina que consideraba de escasa o nula utilidad para el investigador. Según él, al filósofo de la ciencia corresponde clarificar y delimitar los términos y los conceptos empleados por los científicos, pero no prescribir cómo estos deben usarlos.

Otra de las facetas en que destacó Weinberg fue como educador de nuevas generaciones de físicos, tanto en su labor docente



STEVEN WEINBERG impartiendo un seminario en el CERN en diciembre 1979. Unos días antes, el físico neoyorkino había viajado a Estocolmo para recibir el premio Nobel.

CERN

—que mantuvo hasta sus últimos momentos— como a través de numerosos libros de texto; desde *Gravitation and cosmology*, su obra de 1972 con la que generaciones de físicos aprendimos relatividad general y cosmología, hasta *Foundations of modern physics*, publicado este mismo año. Mención especial merecen los tres volúmenes de su monumental *The quantum theory of fields* (1995, 1996 y 2000), el que probablemente sea el texto de teoría cuántica de campos más exhaustivo y profundo escrito hasta la fecha.

Firme creyente en el valor social de la ciencia, Weinberg dedicó tiempo y esfuerzo a popularizar la física entre el público no especializado, haciendo siempre gala del máximo rigor, claridad y respeto intelectual por el lector. También su primera excursión en este terreno tuvo como objeto la cosmología. Fue con *The first three minutes*, originalmente publicada en 1977 y actualizada en 1993, donde describía los tres minutos posteriores a la gran explosión que dio origen a nuestro universo. A pesar del tiempo transcurrido, el libro sigue siendo una obra maestra de la divulgación científica que ha inspirado y maravillado a generaciones de físicos y legos por igual.

EL CAMINO DE LA UNIFICACIÓN

La pasión de Weinberg por explicar la naturaleza a un nivel cada vez más fundamental se hizo manifiesta desde su juventud, cuando su interés por la química le condujo a la física atómica y a la mecánica cuántica, al descubrir que eran estas disciplinas las que explicaban las leyes químicas. Su fascinación juvenil por la ciencia se vio estimulada por la atmósfera de la Escuela Secundaria de Ciencias del Bronx, el prestigioso centro público neoyorkino en el que estudió el bachillerato y de cuyas aulas han salido ocho premios nóbel. Uno de ellos, Sheldon L. Glashow, fue de hecho compañero de clase de Weinberg en el Bronx y acabaría compartiendo con él el Nobel de 1979.

Tras graduarse en Cornell en 1954, Weinberg decidió pasar un año en el Instituto Niels Bohr de Copenhague. Recién casado, su intención era dedicar su estancia a estudiar y a prepararse para su tesis doctoral a su regreso a Estados Unidos. Pero las cosas no salieron como esperaba, y lo que había planeado como una combinación de luna de miel extendida y año de estudios se convirtió en su primer contacto con la investigación en general y con la teoría cuántica de campos en particular.

Cuando, tres años después, Weinberg obtuvo su doctorado por la Universidad de Princeton, no corrían buenos tiempos para la teoría de campos. Atrás quedaba el éxito de la electrodinámica cuántica, la teoría que describe la interacción entre electrones y fotones. En la década de 1930, los físicos hallaron que los cálculos en electrodinámica cuántica arrojaban cantidades infinitas carentes de sentido físico, lo que hizo pensar a muchos que se trataba de una teoría inviable. Sin embargo, hacia finales de los años cuarenta, se demostró que era posible eliminar esos infinitos de las predicciones físicas de la teoría «absorbiéndolos» en los valores de las masas y las cargas de las partículas. Dicha técnica matemática, conocida como renormalización, convirtió a la electrodinámica cuántica en una teoría predictiva y libre de incoherencias internas.

No obstante, dicha técnica no funcionaba con la teoría propuesta por Enrico Fermi para describir la interacción nuclear débil, responsable de las desintegraciones radioactivas. Y en cuanto a la interacción nuclear fuerte, que mantiene unido el núcleo atómico, su gran intensidad dificultaba usar las técnicas que hacían posibles los cálculos en electrodinámica cuántica, la cual se basaba en suponer que la interacción entre fotones y electrones no era más que una pequeña perturbación de su movimiento libre.

En un artículo de apenas tres páginas modestamente titulado «Un modelo de los leptones», Weinberg delineó la base de lo que hoy conocemos como teoría electrodébil, uno de los dos grandes pilares del modelo estándar

En 1961, Glashow, que además de compañero de Weinberg en la secundaria lo había sido también en Cornell, formuló una teoría de campos que unificaba el electromagnetismo y la interacción débil. En ella, además del fotón, había tres bosones con masa: dos con carga eléctrica (los bosones *W*) y uno neutro (el bosón *Z*). Pero los problemas persistían, ya que el hecho de que las partículas tuvieran masa arruinaba una propiedad clave de la teoría (su invariancia gauge) e impedía que esta fuera renormalizable. Por tanto, los resultados infinitos permanecían y la teoría parecía carecer de poder predictivo.

Por su parte, los intentos de aplicar la teoría de campos a la interacción fuerte pasaban por explotar otras simetrías, como el isospín o el llamado «camino óctuple». Estas relacionaban entre sí partículas como el protón y el neutrón, o los piones, entre otras. Pero, debido a las diferencias de masa entre ellas, tales simetrías solo podían considerarse aproximadas. A principios de los años sesenta, el descubrimiento del fenómeno de ruptura espontánea de simetría (en el que una simetría está presente en las ecuaciones básicas de la teoría, pero no en sus soluciones) llevó a pensar erróneamente que las simetrías de la interacción fuerte eran aproximadas por estar espontáneamente rotas.

Desde los inicios de su carrera, Weinberg mantuvo la convicción de que si la teoría cuántica de campos era capaz de describir el electromagnetismo, también debería dar cuenta de las

EN SÍNTESIS

El pasado 23 de julio falleció Steven Weinberg, uno de los arquitectos del modelo estándar de la física de partículas y uno de los principales físicos teóricos de la segunda mitad del siglo XX.

Weinberg no solo destacó por sus contribuciones a la física de partículas, la gravitación y la cosmología. Fue también un magistral educador, un divulgador sobresaliente y un firme defensor de la cultura científica.

Pocos físicos contemporáneos han articulado sus ideas sobre la ciencia y la naturaleza con la brillantez con que lo hizo Weinberg. Su legado seguirá siendo una fuente de inspiración para futuras generaciones.



NASA/ESA/J. LOTZ/HFF(STSCI)

LA ENERGÍA OSCURA Y LA VIDA: En 1987, Steven Weinberg acotó el valor de la constante cosmológica usando un argumento «antrópico»; es decir, teniendo en cuenta el hecho experimental de que estamos aquí para hacernos preguntas. Una constante cosmológica positiva y demasiado grande habría acelerado excesivamente la expansión del universo temprano y habría impedido que la materia se aglomerase y formase galaxias, planetas y vida. Junto con otros argumentos, eso le llevó a concluir que la densidad de energía oscura no podía ser muy distinta de la densidad de materia en el universo. Cuando, en 1998, se midió por primera vez la densidad de energía oscura, los datos confirmaron las estimaciones de Weinberg.

interacciones nucleares. En el que puede considerase el primero de sus artículos históricos, había demostrado, junto con Jeffrey Goldstone y Abdus Salam, una conjetura anterior de Goldstone según la cual, cuando una simetría se rompe espontáneamente, aparecen ciertas partículas sin masa. Pero, si esto era así, ¿dónde estaban las partículas sin masa asociadas a las simetrías de la interacción fuerte? Si realmente tenían masa nula, los experimentos de la época ya tendrían que haberlas detectado.

Una manera de evitar la aparición de esas partículas sin masa fue propuesta en 1964 por Robert Brout, François Englert y Peter Higgs. En un principio, Weinberg intentó aplicar su idea a las simetrías de la interacción la fuerte, empeño que concluyó sin éxito. Sin embargo, una mañana de octubre de 1967, mientras conducía al Instituto de Tecnología de Massachusetts, donde por entonces era profesor visitante, cayó en la cuenta de que estaba aplicando «la idea correcta a la teoría equivocada».

Su idea le permitió juntar todas las piezas para delinear la base de lo que hoy conocemos como teoría electrodébil, uno de los dos grandes pilares del modelo estándar. En un artículo de apenas tres páginas modestamente titulado «Un modelo de los leptones», Weinberg demostró que el mecanismo de Brout-Englert-Higgs podía aplicarse de forma natural a la teoría de Glashow de las interacciones débil y electromagnética. Además, su modelo predecía la existencia de lo que hoy conocemos como bosón de Higgs, descubierto en 2012 en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN. Curiosamente, Weinberg dejó los quarks fuera de su modelo porque, en aquellos momentos, no creía en su existencia.

Aunque acabaría convirtiéndose en el artículo más citado en física de partículas durante décadas, «Un modelo de los leptones» pasó inadvertido hasta 1971. Fue ese año cuando Gerard 't Hooft, un joven doctorando de la Universidad de Utrecht, demostró que la clase de teorías a la que pertenecía la propuesta por Weinberg eran renormalizables. Una de las predicciones del modelo era además la existencia de «corrientes débiles neutras»: interacciones mediadas por la fuerza débil en las que no se transfiere carga eléctrica. Estas fueron observadas en el CERN en 1973 y, en 1978, los experimentos del laboratorio SLAC, en

California, demostraron que sus propiedades coincidían con las predichas por la teoría de Weinberg. Todo ello condujo a que, en 1979, Weinberg recibiese el premio Nobel junto a Glashow y Salam (quien había llegado a la teoría electrodébil de forma independiente) «por sus contribuciones a la teoría unificada de las interacciones débil y electromagnética» y «la predicción de la corriente débil neutra».

TEORÍAS EFECTIVAS

De los numerosos hitos del legado científico de Weinberg, uno de primer orden pero mucho menos divulgado es su trabajo sobre las llamadas «teorías efectivas». Dicho análisis permitió una comprensión mucho más profunda de la teoría cuántica de campos, del modelo estándar y de la gravedad.

Consideremos la cromodinámica cuántica, la teoría de campos que describe la interacción fuerte. En realidad, esta teoría solo resulta útil para calcular procesos entre quarks y gluones a energías muy elevadas. Ello se debe a que, a tales energías, estas partículas interaccionan muy débilmente entre sí. Sin embargo, a energías menores la intensidad de la interacción aumenta, por lo que llega un momento en el que quarks y gluones ya no son útiles para describir los fenómenos. En su lugar, es mucho más conveniente hacerlo en términos de otras partículas «efectivas», como protones, neutrones o piones. Y aunque en principio las interacciones entre estas últimas deberían poder obtenerse a partir de las ecuaciones básicas de la cromodinámica cuántica, en la práctica esto resulta inviable. ¿Cómo construir entonces la teoría de las interacciones fuertes a bajas energías?

En 1979, Weinberg propuso una manera de hacerlo. El primer paso consiste en identificar aquellos estados que, a la energía que nos interesa, interaccionan de manera lo suficientemente débil como para poder identificarlos como partículas. Después habremos de considerar todas las interacciones posibles entre dichas partículas que resulten compatibles con las simetrías de la teoría.

Sin embargo, hay un problema: el número de interacciones que podemos añadir es en principio infinito, lo que parecería significar que la teoría no es predictiva. Pero en realidad sí lo es, ya que, a una energía determinada y con la precisión de nuestros detectores, solo habrá un número finito de interacciones relevantes. El resto no nos interesan, pues su efecto será insignificante a las escalas de energías que estamos explorando. Solo al considerar procesos a energías cada vez mayores llegaremos a una escala donde esas infinitas interacciones empezarán a ser importantes. Esa es la señal de que tenemos que abandonar la descripción efectiva y usar la teoría «completa». En el caso de los piones, esa teoría es la cromodinámica cuántica.

La idea de teorías efectivas revolucionó la teoría cuántica de campos y puso en perspectiva la importancia de la renormalización. A diferencia de lo que ocurre en las teorías renormalizables, como la electrodinámica cuántica, para eliminar los resultados infinitos en una teoría no renormalizable no basta con redefinir cargas y masas. Es necesario introducir un número infinito de nuevas interacciones, a fin de poder absorber en ellas todas las cantidades divergentes que aparecen en los cálculos. Pero lo importante es que esas teorías siempre tendrán una escala de energías característica, por debajo de la cual las nuevas interacciones quedarán suprimidas. Así, siempre que nos mantengamos a energías lo suficientemente bajas, solo un pequeño número de ellas serán apreciables. Por tanto, que una teoría no sea renormalizable no constituye un problema, sino tan solo una señal de que estamos tratando con una teoría efectiva.

Esta idea permite añadir todo tipo de interacciones «no renormalizables» al modelo estándar, las cuales solo serán importantes a la escala de energías a la cual aparezca nueva física. Weinberg construyó interacciones de este tipo (los hoy conocidos como «operadores de Weinberg») que permiten dar cuenta, por ejemplo, de la masa de los neutrinos y otros fenómenos. Y la misma idea puede aplicarse a la relatividad general: a energías mucho menores que la escala de Planck, la teoría puede cuantizarse en términos de una teoría efectiva de gravitones que interaccionan débilmente. Solo al acercarnos a la escala de Planck tendríamos que usar la teoría completa de gravedad cuántica, cuya forma aún hoy seguimos sin conocer.

En una serie de influyentes trabajos a principios de los años noventa, Weinberg aplicó la idea de teoría efectiva al estudio de la interacción entre protones y neutrones. Ello supuso una revolución en física nuclear, ya que permitió abordar a partir de primeros principios el problema de la estructura del núcleo atómico y de la materia nuclear de forma sistemática y precisa. Tanto es así que, este año, algunas revistas especializadas están publicando series de artículos para conmemorar el trigésimo aniversario de las contribuciones de Weinberg.

Weinberg veía la ciencia como una red jerárquica de principios que se van explicando en términos de otros más fundamentales. Esa convergencia explicativa era para Weinberg el principal indicio de la existencia de una teoría final, el verdadero *leitmotiv* de su obra científica

INDICIOS DE UNA TEORÍA FINAL

En línea con su trabajo sobre teorías efectivas, Weinberg visualizaba la ciencia como una red jerárquica de principios que se van explicando en términos de otros más fundamentales. Las leyes de la química son explicadas por la mecánica cuántica del átomo, y este por la física de partículas. La estructura de esa red no presenta huecos ni partes disconexas, y el flujo de explicaciones va convergiendo a un número progresivamente menor de principios cada vez más básicos.

Esa convergencia de la cadena explicativa era para Weinberg el principal indicio de la existencia de una teoría final, el verdadero *leitmotiv* de su obra científica. La física de partículas, como la disciplina más fundamental, tendría como objetivo el descubrimiento de esa explicación última. Sin embargo, Weinberg rechazó el nombre de «teoría del todo», ya que, a efectos prácticos, los sistemas químicos o biológicos necesitarían ser explicados

en términos de sus propias leyes efectivas, por más que estas fueran, al menos en principio, reducibles a otras más fundamentales y, en último término, a la teoría final.

Este reduccionismo teórico fue otra causa de polémica con los filósofos de la ciencia y también con algunos de sus colegas físicos, quienes, como Philip Anderson, defendían la autonomía de las leyes de los sistemas complejos. Weinberg siempre enfatizó que el carácter fundamental de una disciplina no era un juicio de valor sobre ella, sino tan solo un reflejo de la estructura lógica presente en la propia naturaleza. La física de partículas es más fundamental que, por ejemplo, la física de la materia condensada, no porque sea intelectualmente más profunda, sino porque sus objetos de estudio son más elementales.

Como nada en nuestro conocimiento del universo indica un papel especial del género humano en el orden natural de las cosas, la ciencia era para Weinberg también una actividad existencial: algo que dota a la vida del propósito que no hallamos en la ley natural. Nada expresa mejor esta idea que las palabras con que cerró *The first three minutes*: «El esfuerzo por comprender el universo es una de las pocas cosas que eleva la vida humana por encima de la farsa y le da algo de la elegancia de la tragedia».

FIGURA PÚBLICA

Como uno de los líderes de la física de altas energías, Weinberg participó en los años ochenta en el comité del malogrado Supercolisonador Superconductor (SSC), un acelerador de 85 kilómetros que tendría que haber comenzado sus operaciones en Texas a mediados de los años noventa. Planificado para acelerar protones a una energía tres veces mayor que la que actualmente puede alcanzar el LHC, el SSC pretendía detectar el bosón de Higgs y cualquier posible indicio de nueva física. El proyecto se vio dificultado desde sus inicios por obstáculos presupuestarios, ya que el Congreso de EE.UU. debía dotar cada año las partidas económicas para su desarrollo y construcción.

El SSC significaba para Weinberg un paso decisivo hacia la ansiada teoría final, y como tal defendió el proyecto ante el Comité de Ciencia del Congreso. En su testimonio se enfrentó no solo a las críticas de los congresistas, sino también a las de físicos como Anderson y James Krumhansl, quienes se oponían a lo que consideraban un gasto desmesurado en física de partículas que, en su lugar, debía destinarse a otros fines científicos. El proyecto fue definitivamente cancelado en 1993, aunque, según enfatizaba Weinberg, ello nunca supuso la trasferencia de financiación a ninguna otra área científica.

Esta experiencia ante el Congreso fue la base sobre la que construyó su segundo gran libro de divulgación, *Dreams of a final theory* (1993), una espléndida exposición de la física de partículas contemporánea y de su visión de la ciencia y la naturaleza. Fue en esos mismos años cuando se inició la transformación de Weinberg en referente cultural. Particularmente relevantes en esta faceta fueron sus frecuentes artículos en la revista *New York Review of Books*, muchos de los cuales serían incluidos en sus libros recopilatorios *Facing up* (2001), *Lake views* (2011) y *Third thoughts* (2018). Aparte de pronunciamientos sobre la actualidad política y social, en ellos trató los temas más diversos, desde el posmodernismo y la importancia de la ciencia en la sociedad hasta el papel de la caballería en la estrategia militar de la Europa medieval, entre muchos otros.

Todos los libros de Weinberg rebosan referencias históricas, y él admitió repetidamente su afición por la historia de la ciencia. En 2015 fue más allá y publicó *To explain the world*, un viaje personal por las ideas relativas a la naturaleza desde la antigua Grecia hasta la revolución newtoniana. La obra atrajo la atención de historiadores de la ciencia, quienes acusaron a Weinberg de valorar los hechos históricos a la luz del progreso hacia la ciencia actual, y no dentro del contexto intelectual en el que surgieron. Con todo, cabe decir que esta visión de la historia de la ciencia, conocida por el término inglés *whig*, estaba en plena concordancia con la filosofía de la naturaleza de Weinberg: la realidad de la ley natural dota a la historia de la ciencia de un punto focal —ausente en la historia general— desde el que juzgar los diferentes desarrollos según su contribución al progresivo descubrimiento de esos principios. Una visión gradual y acumulativa de la ciencia que siempre contrapuso a las ideas de Thomas S. Kuhn, para quien la noción del progreso en ciencia estaba limitada al desarrollo interno de paradigmas, pero donde los sucesivos cambios de paradigma no nos acercarían a ninguna «verdad» sobre la naturaleza.

UN LEGADO PERMANENTE

Además de las obras ya mencionadas, en sus casi 200 artículos científicos (tres cuartas partes de ellos como único autor), Weinberg realizó numerosas contribuciones clave a la física de partículas y la cosmología, campos que fue pionero en conectar: los modelos de «tecnicolor» (una teoría de generación de masa alternativa al mecanismo de Brout-Englert-Higgs), los axiones, el llamado límite de Lee-Weinberg a la masa de los neutrinos o la cota antrópica al valor de la constante cosmológica, por mencionar solo unos pocos. Su influencia en la física teórica de la segunda mitad del siglo xx ha sido de tal magnitud y extensión que puede ser comparada con la de los grandes nombres de la edad dorada de la física de partículas, como Richard Feynman o Murray Gell-Mann.

Weinberg sigue con nosotros no solo a través de su obra científica y de sus libros. Tenemos la fortuna de vivir en una época en la que una simple búsqueda en Internet nos permite disfrutar de sus conferencias y entrevistas. Su gran personalidad y sus excelentes dotes de comunicador seguirán recordándonos la importancia de la ciencia como parte integral de la cultura y sirviendo de fuente de inspiración a futuras generaciones. IyC

PARA SABER MÁS

A model of leptons. Steven Weinberg en *Physical Review Letters*, vol. 19, págs. 1264-1266, noviembre de 1967.
Phenomenological Lagrangians. Steven Weinberg en *Physica A*, vol. 96, págs. 327-340, abril de 1979.
El sueño de una teoría final. Steven Weinberg. Editorial Crítica, 1994.
Los tres primeros minutos del universo. Steven Weinberg. Alianza Editorial, 1996.
Explicar el mundo. Steven Weinberg. Editorial Taurus, 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

La vida en el universo. Steven Weinberg en *IyC*, diciembre de 1994.
La unificación de la física. Steven Weinberg en *IyC*, enero de 2000.
Perspectivas de unificación. Amir D. Aczel; entrevista a Steven Weinberg en *IyC*, enero de 2011.
De la superconductividad al bosón de Higgs. Miguel Á. Vázquez-Mozo en *IyC*, julio de 2014.
El problema de la mecánica cuántica. Steven Weinberg en *IyC*, agosto de 2017.

ENFERMEDADES NEUROLÓGICAS

UNA NUEVA VISIÓN DEL ALZHÉIMER

La búsqueda de tratamientos contra las enfermedades neurodegenerativas se enfoca ahora en las células de la microglía, que desempeñan funciones inmunitarias en el cerebro

Jason Ulrich y David M. Holtzman

Ilustración de Ruaida Mannaa

En 1907 el psiquiatra alemán Alois Alzheimer publicó el caso clínico de una enfermedad insólita que afectaba a la corteza cerebral. Una interna de 51 años de un hospital psiquiátrico de Fráncfort del Meno mostraba los síntomas que tan bien conocen los millones de familias afectadas por la hoy llamada enfermedad de Alzheimer: pérdida de memoria, confusión y desorientación.

A su muerte, Alzheimer examinó el cerebro y realizó algunas observaciones fundamentales. En primer lugar, el órgano era más pequeño que la media, atrófico, con la esperable merma de neuronas. Por otro lado, mostraba ovillos de fibras de cierta proteína en el interior de las neuronas y depósitos de otra proteína fuera de ellas. En los cien años siguientes estas dos proteínas patológicas, llamadas tau y amiloide, acapararon el interés de los investigadores sobre las causas de la enfermedad.

Pero Alzheimer consignó en la autopsia otro hallazgo más, a menudo olvidado. Observó al microscopio unas alteraciones evidentes en la conformación estructural de ciertas células no neuronales: la glía, que supone cerca de la mitad de las células cerebrales.

Estudiada solo por unos pocos tras el descubrimiento de Alzheimer, la glía atrae ahora todas las miradas. Una de sus estirpes, la microglía, es el principal tipo de célula inmunitaria



Jason Ulrich es profesor titular de neurología en la Universidad de Washington en San Luis.

David M. Holtzman es catedrático de neurología, director científico del Centro Hope de Trastornos Neurológicos de la misma universidad y director asociado del Centro Knight para la Investigación de la Enfermedad de Alzheimer.





del cerebro e influiría en la progresión de la enfermedad de diversas formas, tanto en las etapas iniciales como posteriores. También llamadas microgliocitos, estas células podrían explicar asimismo la compleja relación entre el amiloide y la tau, las proteínas anómalas responsables de la degeneración neuronal y la pérdida de memoria.

En la última década se han descubierto nuevos factores de riesgo moleculares que implican a estas células inmunitarias cerebrales en la enfermedad de Alzheimer. Gracias a los potentes métodos de secuenciación genética, comenzamos a entender la microglía y el papel del sistema inmunitario y sus procesos inflamatorios en el alzhéimer.

Aunque hemos aprendido mucho sobre la bioquímica de las proteínas tau y amiloide, así como sobre algunos de los factores genéticos y del modo de vida que influyen en el riesgo de padecer alzhéimer, prácticamente no existen tratamientos que detengan o retrasen su progresión. El pasado 7 de junio, la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de Estados Unidos aprobó un nuevo medicamento, el aducanumab, que elimina el amiloide del cerebro. Pero no está claro en qué medida restituye las habilidades cognitivas de los enfermos. Se precisan, pues, más tratamientos. Los recientes descubrimientos sobre la microglía han planteado nuevas posibilidades terapéuticas, varias de las cuales se encuentran ya en fase de desarrollo e incluso de ensayo clínico con pacientes.

PLACAS, OVILLOS Y GENES

El alzhéimer es la principal causa de demencia en el mundo y las alteraciones que provoca se acumulan y convergen a lo largo de décadas. Dos son los rasgos moleculares distintivos que lo caracterizan. El primero son las placas compuestas por la variante β del amiloide, un péptido, o proteína pequeña, que se concentra en los espacios entre las células.

El segundo signo consiste en formas «retorcidas» de la proteína tau plegadas de forma anómala, a las que se unen numerosos grupos fosfato en un proceso conocido como hiperfosforilación. Este aumento de la fosforilación se acompaña de mayor agregación y toxicidad de la proteína, que forma aglomerados enmarañados en los cuerpos de las neuronas, los ovillos neurofibrilares. También aparece junto a las placas de amiloide, en los axones dilatados y dañados (el axón es la prolongación alargada que arranca del cuerpo neuronal); en este caso se trata de la tau de la placa neurítica.

Tanto la tau como la proteína de mayor tamaño de la que deriva el amiloide desempeñan tareas normales en la célula que resultan alteradas por el proceso patológico del alzhéimer. De los extensos estudios sobre las formas aberrantes de amiloide y tau se desprende que conviene dividir la enfermedad en dos etapas. La primera es una fase presintomática, de unos 15 a 25 años, en la que el amiloide se acumula en la corteza, la capa más externa del cerebro, sin generar síntomas cognitivos. En la segunda aparecen los ovillos de tau en la corteza y se desata la neurodegeneración, acompañada de una creciente disfunción cognitiva a medida que las células cerebrales mueren.

Los investigadores de este campo saben desde hace décadas que ciertos factores de riesgo genéticos influyen de forma determinante en la probabilidad de padecer alzhéimer y que los genes aportan una valiosa información sobre los mecanismos subyacentes. El principal gen de riesgo es el *APOE*. Codifica la apolipoproteína E, que participa en el metabolismo de los lípidos y del colesterol. (Las denominaciones alfanuméricas de los genes se escriben por lo común en letra cursiva, mientras que las de las proteínas que codifican se escriben en redonda.)

La relación del gen con el alzhéimer, descrita por primera vez en 1993, atañe a una de sus versiones (alelo), que aumenta drásticamente el riesgo de contraer la enfermedad. Los tres alelos de *APOE* habituales en la población humana son *APOE2*, *APOE3* y *APOE4*. El más frecuente, el *APOE3*, supone alrededor del 78 por ciento de todos los alelos, el *APOE4* representa en torno al 14 por ciento y el *APOE2* ronda el 8 por ciento. Cada persona posee dos alelos de *APOE* y cerca del 25 por ciento de la humanidad es portadora de al menos un alelo *APOE4*, porcentaje que se eleva al 60 por ciento en los enfermos de alzhéimer.

La probabilidad de padecer este mal se multiplica por tres o cuatro si se es portador de un solo alelo *APOE4* y hasta por doce si se tienen dos copias del mismo en comparación con cualquier persona dotada de una pareja de alelos *APOE3*. En las personas portadoras de *APOE4* los depósitos de placas de amiloide surgen antes y con más profusión porque su versión de la apolipoproteína E disminuye la eliminación cerebral de amiloide β y facilita su agregación. En cambio, las personas con *APOE2* no corren tanto riesgo y son mucho menos propensas a la patología amiloidea.

A pesar de la intensidad del efecto del *APOE4*, este por sí solo no explica toda la predisposición genética a la enfermedad. Los genetistas han buscado tenazmente otros factores de riesgo que expliquen toda esa heredabilidad. Así, los avances en la secuenciación genética han permitido analizar sistemáticamente a miles de personas en busca de los cambios del ADN asociados a la mayor o menor predisposición al alzhéimer.

El cribado a gran escala ha revelado regiones genéticas y genes que parecen influir en el riesgo. Entre ellos destacan variantes de genes (*CD33*, *BIN1*, *CR1* y *MS4A6A*) que codifican pro-

EN SÍNTESIS

Las décadas de fracasos en la búsqueda de tratamientos contra el alzhéimer que tengan como diana las proteínas tau o amiloide han impulsado la investigación en otros campos de la enfermedad.

Los últimos descubrimientos en torno a la microglía cerebral abren nuevas posibilidades de tratamiento. Varias ya se hallan en fase de desarrollo o de ensayo clínico con pacientes.

Una de las nuevas dianas terapéuticas es la proteína TREM2, que juega un papel clave en la activación de la microglía cuando las neuronas empiezan a morir y surgen los primeros síntomas.

VIEJOS Y NUEVOS PROTAGONISTAS

Rastro genético hacia las raíces del alzhéimer

Frustrados por los fracasos de los nuevos tratamientos, muchos investigadores de la enfermedad de Alzheimer han desplazado su atención hacia genes como *TREM2*, que codifica una inmunoproteína, y *APOE4*, el factor de riesgo genético más potente de este mal. Del estudio de dichos genes están surgiendo nuevas ideas para ayudar a los cincuenta millones de personas que se calcula padecen esta enfermedad en el mundo (unas 800.000 en España).

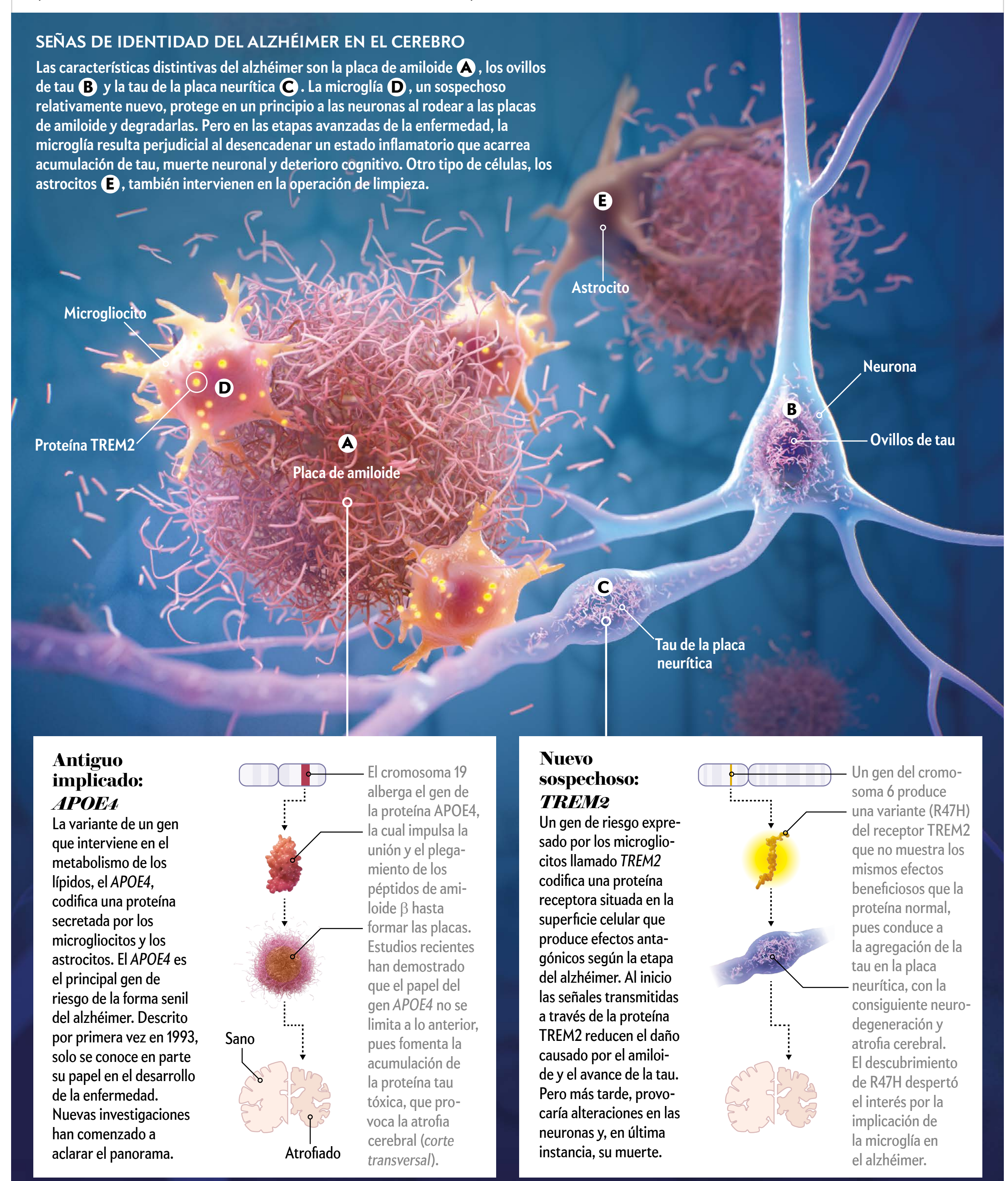


ILUSTRACIÓN DE AXS BIOMEDICAL ANIMATION STUDIO

teínas con variadas funciones. Por ejemplo, *CD33* y *CR1* acogen las instrucciones genéticas de algunos receptores de la superficie celular que detectan señales emitidas por otras células. Estos genes descubiertos mediante el cribado de poblaciones agravan relativamente poco el riesgo de alzhéimer.

También se han secuenciado los genomas de miles de personas con alzhéimer en busca de variantes raras que influyan de modo notable en el riesgo. Varias de ellas se expresan predominantemente en la microglía, las principales células inmunitarias del cerebro. En 2013 dos estudios identificaron una variante minoritaria de *TREM2*, un gen codificador de un receptor que atraviesa la membrana celular de los microgliocitos, que aumenta considerablemente la propensión al alzhéimer.

Los datos de secuenciación revelaron una variante sustitutoria del aminoácido arginina por histidina. Esta mutación afectaba al funcionamiento de la microglía y aumentaba de dos a cuatro veces el riesgo de alzhéimer. Pues bien, como varios de los otros nuevos genes de riesgo, el *TREM2* se expresa exclusivamente en la microglía cerebral. Estos datos genéticos daban a entender una intervención activa de la microglía en el proceso patológico, pero ¿cómo?

PATRULLA DE VIGILANCIA

La microglía está emparentada con los macrófagos, las células inmunitarias que patrullan por el organismo para combatir a los patógenos o ayudar a reparar el tejido dañado. Según recientes investigaciones, interviene en todas las actividades del cerebro en desarrollo, desde la defensa contra las infecciones hasta la poda de las sinapsis (las uniones entre las neuronas) sobrantes. En condiciones normales, los microgliocitos poseen un pequeño cuerpo celular del que brotan ramificaciones que se extienden por todo el tejido cerebral. Las células inmunitarias devoran —o, para ser precisos, fagocitan— las sinapsis innecesarias y los desechos y buscan signos de lesión o de infección.

Si se produce una lesión, la forma y la función de la microglía cambian. Los cuerpos celulares aumentan de tamaño, mientras que las ramas se acortan y disminuyen en número. Los microgliocitos migran al lugar de la lesión para iniciar una respuesta inflamatoria. Han sido observados alrededor de las placas de amiloide desde hace décadas, pero se desconocía si su papel era poner coto a la acumulación de amiloide o iniciar una inflamación tóxica. Tampoco se comprendía bien su relación con la tau.

Algunos estudios han indicado que la microglía actúa en las neuronas dañando los axones y las sinapsis, de modo que interfiere en la transmisión axonal de señales y provoca la acumulación de tau en las células.

Otras investigaciones muestran que ciertas proteínas inflamatorias que secretan los microgliocitos, las citocinas, aumentan drásticamente el proceso destructivo de la hiperfosforilación. El descubrimiento de factores genéticos de riesgo como son *TREM2* y *CD33* puso de manifiesto que algunas moléculas de la microglía podrían intervenir en el alzhéimer. Se espera que conocer el funcionamiento de dichas proteínas permita desentrañar la implicación más amplia de estas células en la evolución de la dolencia.

Los ratones de laboratorio son un medio muy útil para estudiar la influencia de los factores genéticos en los distintos tipos de alteraciones cerebrales que se observan en la demencia por alzhéimer en los humanos. Por el momento, pocos animales de experimentación reproducen todos los aspectos de la enfermedad (como un ratón que muestre acumulación de placas de amiloide, seguida de la propagación de tau patológica y la consiguiente neurodegeneración), pero se han creado varias decenas de «modelos», es decir, ratones diseñados genéticamente para producir placas de amiloide o tau.

Al cruzar estos ratones transgénicos con otros diseñados para expresar alteraciones de genes de riesgo del alzhéimer, es posible averiguar cómo influye una variante genética en diferentes aspectos de un proceso patológico similar. Por ejemplo, hace dos décadas se demostró que los modelos murinos de amiloide concebidos para expresar la proteína APOE4 humana generaban más placas de amiloide que los ratones portadores de las variantes génicas *APOE3* o *APOE2*. En los últimos años, los investigadores han evaluado el papel de la proteína humana TREM2 en el alzhéimer mediante la eliminación del gen *TREM2* en modelos de patología amiloidea en ratones. Varios laboratorios observaron invariablemente en tales roedores una marcada reducción del número de microgliocitos alrededor de las placas de amiloide.

En una serie de estudios del laboratorio de Marco Colonna en la Universidad de Washington en San Luis, se descubrió que en los ratones carentes del gen *TREM2* los microgliocitos no podían acelerar adecuadamente su metabolismo. Al aproximarse a las placas de amiloide, no producían suficiente trifosfato de adenosina (ATP), molécula que alimenta la actividad celular. Desprovistas de energía, las células eran incapaces de rodear las placas de amiloide. Después se vio un aumento de las lesiones axionales con hinchazón (neuritas distróficas), causadas por los daños del amiloide.

Estas observaciones fundamentales, la reducción de la microglía alrededor de las placas y el acusado deterioro de los axones, también se advirtieron en cortes cerebrales de personas fallecidas con alzhéimer que presentaban una mutación rara en *TREM2* conocida como R47H y descubierta en 2013. Este hallazgo generó mayor confianza en que los descubrimientos en el ratón fueran aplicables al comportamiento del *TREM2* en los humanos. Además, el grupo de Jaime Grutzendler en la Universidad de Yale demostró que cuantos menos microgliocitos rodeaban una placa, mayor era el deterioro de los axones cercanos.

Ese estudio aportó nuevos indicios sobre la importancia de la microglía en la protección contra los efectos tóxicos del amiloide en la periferia de las placas. También reveló que la microglía interactúa con los extremos de las diminutas fibras de amiloide, lo que podría detener su crecimiento o proteger a las neuronas circundantes de los efectos nocivos de esta proteína.

SEMILLAS TÓXICAS

Si la microglía protege los axones frente al daño causado por las placas de amiloide, ¿podría proteger también frente a la alteración de tau? En tal caso, las mutaciones peligrosas de *TREM2*, como la R47H, podrían exacerbar las lesiones del alzhéimer al facilitar la formación de la tau de la placa neurítica cerca de las placas de amiloide. Aunque poner a prueba esta hipótesis no es empresa fácil, las investigaciones que exploran la propagación de la tau deformada de manera parecida a los priones, las proteínas características de enfermedades como la de Creutzfeldt-Jakob, una de cuyas variantes se asocia al mal de las «vacas locas», ofrecen algunas pistas.

En la última década se ha descubierto que la tau y el amiloide se pliegan en conformaciones aberrantes a modo de «semilla» priónica, que induce el posterior plegamiento erróneo de

otras proteínas cuya estructura era normal. De esta manera, la tau anómala se va propagando a las regiones cerebrales conectadas a medida que avanza el alzhéimer. Una serie de artículos del laboratorio de Virginia Man-Yee Lee en la Universidad de Pensilvania demostró que la inyección en el encéfalo de ratones normales de unos conglomerados de semillas de tau aislados de cerebros con anomalías de alzhéimer causaba el plegado incorrecto de la tau murina en ovillos neurofibrilares. En los ratones que ya presentaban trastornos amiloides, apareció tau de la placa neurítica, la forma proteica que daña los axones. Este último proceso se asemeja a la cadena de sucesos del alzhéimer. Si bien los ratones no sufrieron una neurodegeneración importante, el planteamiento de la «siembra» brindó un método fiable para estudiar los procesos patológicos del amiloide y de la tau.

En condiciones normales, cuando no participa en el desarrollo del alzhéimer, la tau se encuentra en los axones e interviene en la estabilización de unas proteínas estructurales llamadas microtúbulos que facilitan el transporte de materiales celulares de una parte a otra de la neurona. El equipo de Lee descubrió que la tau de los axones hinchados próximos a las placas de amiloide se soltaba de los microtúbulos, lo que en principio la predisponía a la deformación. En definitiva, estos axones dañados se convertían en un terreno propicio para el arraigo de las semillas de tau patológica procedentes de la corteza circundante repleta de amiloide.

Puesto que la presencia en la microglía de la proteína TREM2 portadora de la mutación nociva R47H agrava el deterioro axonal, dedujimos que la forma más común de TREM2 podría propiciar la protección de los axones cercanos a la placa de amiloide por las células inmunitarias, lo que evitaría que las semillas de tau fomentaran la acumulación de esta proteína o invadieran otras áreas de la corteza. En un estudio dirigido por Cheryl Leyns y Maud Gratuze, entonces miembros de nuestro laboratorio, inyectamos semillas de tau de un cerebro con alzhéimer en modelos de ratón con y sin genes que expresaran la proteína TREM2 funcional y constatamos que los roedores carentes de ella producían mucha más tau de la placa neurítica en los axones agrandados. El daño se propagó a otras regiones del cerebro a través de las redes de neuronas conectadas.

También utilizamos modelos de ratón desarrollados por Colonna que expresaban TREM2 humana normal o la forma R47H. De nuevo, los modelos murinos de amiloide con la variante R47H produjeron más tau patológica de la placa neurítica cerca de las placas de amiloide tras la inyección de las semillas de tau. Para confirmar los hallazgos de los modelos de roedor, también examinamos cerebros humanos y vimos que las personas con variantes de TREM2 asociadas al alzhéimer presentaban más tau de la placa neurítica. Ante estas observaciones, llegamos a la conclusión de que la TREM2 normal, y quizás la microglía en general, protegen frente a la siembra y la propagación de la tau por el cerebro inducidas por el amiloide.

La microglía parece impedir la diseminación de la tau nociva en la corteza cargada de amiloide que es típica de la primera fase del alzhéimer. Ahora bien, ¿persiste esa acción protectora una vez que aparecen los ovillos neurofibrilares en la corteza y se desata la neurodegeneración durante la fase sintomática de la enfermedad? Dos influyentes estudios, uno del laboratorio de Ido Amit en el Instituto de Ciencias Weizmann en Rehovot, Israel, y el otro del equipo de Oleg Butovsky del Brigham and Women's Hospital, examinaron los cambios de la actividad de genes microgliales en modelos de ratón de varias enfermedades neurodegenerativas y descubrieron similitudes notables en el modo de activación de tales genes.

De los nuevos datos se deduce que la microglía actuaría de forma antagónica durante la progresión del alzhéimer: protegería frente a las placas de amiloide, pero agravaría el daño cerebral vinculado con tau

Comprobaron que, en el cerebro de los ratones con lesiones neurodegenerativas semejantes a las debidas a la tau patológica, la microglía activaba diversos genes, muchos de los cuales codificaban proteínas encargadas de degradar materiales de desecho en la célula. En ese momento, aumentaba fuertemente la expresión de una versión murina del gen de riesgo *APOE4*. Al parecer, tanto APOE como TREM2 desempeñan un papel clave a la hora de determinar si se activa una respuesta de la microglía cuando las neuronas comienzan a morir y aparecen los síntomas por primera vez.

Ese descubrimiento nos llevó a cruzar ratones que expresaban diferentes versiones de la APOE humana con un modelo de este roedor en el que aparecen alteraciones de la tau y también neurodegeneración intensa. En un estudio dirigido por Yang Shi en nuestro laboratorio de la Universidad de Washington en San Luis, un modelo murino de tau que expresaba APOE4 mostró mayor neurodegeneración y desarreglos de la tau más avanzados que los ratones con APOE3 o APOE2. A continuación, evaluamos la muerte celular en personas con alzhéimer u otras enfermedades neurodegenerativas donde se producen grandes acumulaciones de tau. Vimos que los portadores del alelo *APOE4* sufrían mayor daño cerebral que los que poseían otros alelos.

Además, en los enfermos de alzhéimer portadores de la variante *APOE4* el deterioro fue más rápido que en los no portadores. Este hallazgo nos sorprendió, a nosotros y a otros investigadores, puesto que durante muchos años se había pensado que el principal efecto del *APOE4* era la acumulación de grandes cantidades de amiloide. Sin embargo, estos estudios indicaban que no solo intervenía en la regulación de la patología amiloidea, sino que también determinaba la velocidad de la muerte neuronal en respuesta a las alteraciones de la tau. Por tanto, el «gen del alzhéimer», como se conoce al *APOE4*, no solo influye en el depósito de amiloide, sino también en el daño neurológico causado por la acumulación de tau, las dos etapas principales de la enfermedad.

La profundización en el conocimiento del *APOE4* condujo al siguiente experimento con ratones. Averiguamos que la eliminación de la versión murina del gen *APOE* protegía en gran medida frente a la neurodegeneración y retrasaba la progresión

de las aberraciones de la tau y, lo que es más importante, el daño cerebral causado por su acumulación. Si la eliminación del gen es neuroprotectora en los modelos de ratón, quizás la disminución de los niveles de la proteína APOE en el cerebro humano ralentice la neurodegeneración, sobre todo en los portadores de la variante *APOE4*.

En otro experimento recurrimos al modelo murino de tau, que también expresaba el *APOE4* humano, para comprobar si la reducción de los niveles de esa variante de la apolipoproteína protegería de la neurodegeneración. Colaboramos con Ionis Pharmaceuticals a fin de emplear oligonucleótidos de antisentido, tramos cortos de ADN modificado que degradan el ARN mensajero (las instrucciones moleculares con las que la célula produce una proteína específica), para rebajar a la mitad la cantidad de APOE4 cerebral de los ratones. Con el descenso de los niveles de APOE4 en el momento en que comenzaban a arraigar las alteraciones de la tau, se conservaron las neuronas y disminuyó la inflamación y la activación de la microglía en el cerebro de los animales.

De los nuevos datos se deduce que la microglía actuaría de dos maneras durante la progresión de la demencia por alzhéimer. En los modelos murinos de patología amiloidea, el aumento de la actividad microglial alrededor de las placas parece proteger el cerebro. En los ratones con trastorno de tau, la proteína anómala aumenta sensiblemente la expresión de genes microgliales asociados a la neurodeneración, y la APOE4 parece acrecentar el proceso. Todo ello indica una intensa respuesta inmunitaria de la microglía frente a la alteración de la tau, asociada al aumento, no de la protección, sino del daño cerebral.

Por supuesto, la correlación no es sinónimo de causalidad, y en ese punto de nuestra investigación no estaba claro si la enérgica respuesta inmunitaria observada en los modelos de tau que expresaban la APOE4 impulsaba la degeneración o solo era una reacción a ella. Nos preguntábamos si la ausencia de TREM2, el receptor de la superficie de los microgliocitos, aumentaría la neurodegeneración y la inflamación en el cerebro. No nos habría sorprendido demasiado que la microglía interviniera para proteger las neuronas, incluso en esa etapa relativamente tardía de la enfermedad.

Se llevó a cabo un nuevo experimento de reducción de la actividad genética. La eliminación de TREM2 en modelos murinos de tau disminuyó la respuesta microglial y el grado de neurodegeneración. El hallazgo daba a entender que la reducción de la actividad de la microglía se traducía en menos daño y menos atrofia cerebral a causa de la tau patológica.

UN ARMA DE DOBLE FILO

Dos estudios de 2019 arrojaron más pruebas de que la microglía fomenta la pérdida de neuronas, con el consiguiente deterioro cognitivo que acontece en fases más avanzadas de la enfermedad. La administración a los ratones de un medicamento que bloqueaba una proteína fundamental, necesaria para la supervivencia de la microglía (el factor estimulante de colonias de tipo 1), eliminó alrededor del 90 por ciento de los microgliocitos del cerebro. En los modelos murinos de tau, las alteraciones de la tau y la neurodegeneración decrecieron drásticamente en los animales que recibieron el fármaco, lo que indica que la microglía es necesaria para que surja la neurodegeneración dependiente de la tau. Los resultados demuestran que la transmisión de señales por la TREM2 parece producir efectos paradójicos —protectores o perjudiciales—, según la etapa de la enfermedad.

Así pues, es probable que la transferencia de señales por la TREM2 durante la fase presintomática y, posiblemente, la sintomática inicial del alzhéimer, cuando se acumula el amiloide, reduzca el daño que este causa en los axones y las sinapsis cercanos. También impide que la tau se extienda por la corteza. No obstante, una vez bien asentadas las alteraciones de la tau, la microglía podría ocasionar pérdida de sinapsis y muerte neuronal.

Si el efecto lesivo de la microglía observado en los modelos murinos de tau patológica reprodujera el proceso de la enfermedad de Alzheimer humana, lo que aún es mucho suponer, actuar sobre la microglía podría convertirse en una estrategia de tratamiento viable. Lo mejor sería, quizás, potenciar su activación, en especial alrededor de las placas de amiloide, en las fases presintomática y sintomática inicial de la enfermedad. En cambio, en las etapas más avanzadas del trastorno de la tau, disminuir la respuesta de la microglía podría enlentecer la neurodegeneración y, por ende, el deterioro cognitivo.

A medida que conozcamos mejor el comportamiento de la microglía en respuesta a los procesos patológicos del amiloide y la tau, tal vez encontremos nuevas dianas terapéuticas con que tratar esta enfermedad desoladora. Un ensayo clínico en humanos está examinando en este momento si la activación de TREM2 enlentece la evolución del alzhéimer en su primera etapa, y otros muchos tratamientos dirigidos a la microglía están entrando en fase de desarrollo farmacéutico. Si estos planteamientos culminan con éxito, el tercer hallazgo pasado por alto de la famosa autopsia de Alzheimer, tras las conocidas placas y ovillos, podría acabar siendo esencial para aliviar las terribles consecuencias en el cerebro de los enfermos. IyC

PARA SABER MÁS

TREM2 function impedes tau seeding in neuritic plaques. Cheryl E. G. Lenys et al. en *Nature Neuroscience*, vol. 22, págs. 1217-1222, 2019.
ApoE4 markedly exacerbates tau-mediated neurodegeneration in a mouse model of tauopathy. Yang Shi, Kaoru Yamada et al. en *Nature*, vol. 549, págs. 523-527, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

El sistema inmunitario del cerebro. Wolfgang J. Streit y C. A. Kincaid-Colton en *IyC*, enero de 1996.
El estrecho nexo entre la inmunidad y el cerebro. Jonathan Kipnis en *IyC*, octubre de 2018.
Las bases neurobiológicas del alzhéimer. Kenneth S. Kosik en *IyC*, julio de 2020.



COMPUTACIÓN CUÁNTICA

El futuro cuántico de la química

Por qué los ordenadores cuánticos podrían cambiar para siempre la manera de investigar en química

Jeannette M. Garcia

Ilustración de Richard Borge



Jeannette M. García es directora del grupo de teoría, algoritmos y aplicaciones cuánticas de IBM Research. Su equipo se dedica a investigar aspectos teóricos y aplicaciones científicas de la computación cuántica.



n mi carrera como química he contraído una enorme deuda con la serendipia. En 2012 me encontraba en el lugar correcto (el Laboratorio Almaden de IBM, en California) en el momento adecuado, pero cometí un «error». Confiaba en crear cierto material conocido mezclando sus tres componentes en un vaso de precipitados, pero pretendía sustituir uno de ellos por una versión derivada de residuos plásticos. El objetivo consistía en aumentar la sostenibilidad de un tipo de plásticos extraordinariamente resistentes denominados polímeros termoestables.

Sin embargo, cuando combiné dos de los componentes, se formó una sustancia plástica blanca y dura en el vaso. Era tan rígida que me vi obligada a romper el recipiente para extraerla. Además, tras permanecer sumergido en ácido diluido durante toda la noche, se descompuso en sus materiales precursores. Sin buscarlo, había descubierto toda una nueva familia de polímeros termoestables reciclables. De haberlo considerado un experimento fallido y no haber indagado, nunca habríamos averiguado lo que habíamos obtenido. Fue una casualidad científica en su máxima expresión, en la noble tradición de Roy Plunkett, quien inventó el teflón por puro accidente mientras estudiaba la química de los gases refrigerantes.

Actualmente me he propuesto una nueva meta: reducir la necesidad de la serendipia en los hallazgos químicos. Algunos retos, como la crisis climática o la COVID-19, son tan inmensos que las soluciones no deberían depender de la suerte. La naturaleza es compleja y poderosa, y hemos de ser capaces de modelizarla con precisión si aspiramos a conseguir los avances científicos que aún nos urgen. En particular, si pretendemos impulsar la química, deberíamos ser capaces de entender la energética de las reacciones químicas con un alto grado de confianza. La idea no es nueva, pero pone de relieve una seria limitación: predecir con total exactitud el comportamiento de las moléculas, incluso las más sencillas, se encuentra más allá del alcance de muchos de los ordenadores más potentes. Es aquí donde la computación cuántica brinda la posibilidad de lograr grandes progresos en los próximos años.

La modelización de reacciones químicas en ordenadores clásicos exige realizar todo tipo de aproximaciones. Ello se debe a que estas máquinas no pueden calcular con exactitud el comportamiento cuántico de más de un par de electrones, ya que los cálculos son abrumadores y requieren demasiado tiempo. Pero cada simplificación devalúa la calidad del modelo, lo que aumenta la cantidad de trabajo de laboratorio que hace falta para validarlo. Sin embargo, la computación cuántica funciona de otra manera. Cada bit cuántico, o qubit, puede corresponder a los orbitales de espín de un electrón. Estos ordenadores se valen de fenómenos genuinamente cuánticos, como el entrelazamiento, para describir las interacciones electrónicas sin necesidad de hacer aproximaciones. Y la computación cuántica se encuentra en una fase de desarrollo que ya permite empezar a modelizar las propiedades de moléculas pequeñas, como el hidruro de litio. Ello ofrece la posibilidad de elaborar nuevos modelos que abrirían vías de descubrimiento mucho más definidas que las que ahora transitamos.

MODELIZACIÓN DE REACCIONES

La química cuántica no es en absoluto nueva. A principios del siglo xx, Walter Heitler, Fritz London y otros demostraron que el enlace covalente podía explicarse por medio de la mecánica cuántica. A finales del siglo xx, el aumento en la potencia de cálculo de los ordenadores propició la creación de algunos modelos básicos de sistemas clásicos.

Aun así, hacia 2005, la época en que me encontraba haciendo mi tesis doctoral en el Colegio Universitario de Londres, era relativamente raro que los químicos de laboratorio tuvieran un conocimiento funcional de la clase de modelos que podían simularse por ordenador. Tanto las disciplinas como el conjunto de aptitudes que requería cada una eran muy distintas. En lugar de explorar las nuevas perspectivas que aportaban los enfoques computacionales, los químicos de laboratorio se aferraban a procedimientos de ensayo y error, con la esperanza de obtener un hallazgo razonado aunque a menudo fortuito. En mi caso, tuve la suerte de formar parte del grupo de Amir Hoveyda, quien no tardó en reconocer el valor de combinar la investigación experimental con la teórica.

Hoy en día, modelizar reacciones químicas para comprender mejor los resultados experimentales se ha convertido en práctica

EN SÍNTESIS

Las reacciones químicas son tan complejas que resultan imposibles de modelizar con precisión. A pesar de las técnicas computacionales para calcular procesos moleculares, muchos descubrimientos químicos siguen dependiendo del azar.

Esa situación podría cambiar en un futuro próximo gracias a la computación cuántica. En los últimos años, los ordenadores cuánticos ya han conseguido empezar a modelizar con éxito las propiedades de algunas moléculas sencillas.

Una estrategia basada en incorporar algoritmos cuánticos en los procesos de modelización ya existentes permitiría abordar varios problemas, desde la contaminación por plásticos hasta la huella de carbono de numerosos materiales.

habitual. Ello se debe a los avances de la disciplina teórica y al hecho de que los químicos de laboratorio han empezado a incorporar dichos modelos en su trabajo. La información proporcionada por los modelos da lugar a un bucle de retroalimentación que favorece los hallazgos experimentales. Por poner un ejemplo, la explosión de datos que ha proporcionado el cribado de alto rendimiento (una técnica experimental asistida por robots y basada en el ensayo y error) ha permitido la creación de avanzados modelos químicos entre cuyos usos industriales figuran el desarrollo de fármacos y la experimentación con materiales.

El factor limitante de esos modelos radica en la necesidad de simplificar. En cada etapa de la simulación hay que decidir en qué aspectos se sacrifica la precisión para no exceder los límites de lo que el ordenador puede procesar. Usando la terminología propia del campo, se trabaja con modelos «de grano grueso». Cada simplificación afecta a la precisión global del modelo y limita su capacidad de hacer nuevos descubrimientos. Y cuanto más imprecisos sean los datos, más arduo será el trabajo de laboratorio.

El enfoque cuántico es diferente. Al menos en principio, la computación cuántica nos permitiría modelizar los sistemas naturales tal y como son, sin aproximaciones. Tal y como dijo una vez Richard Feynman: «La naturaleza no es clásica, maldita sea, así que si queremos hacer una simulación de la naturaleza, más vale que sea cuántica». En los últimos años hemos sido testigos de los rápidos adelantos logrados por los ordenadores cuánticos. En 2020, IBM duplicó en dos ocasiones su «volumen cuántico» (una medida de la cantidad y la calidad de los qubits de un sistema), y para 2023 prevé obtener un chip con más de 1000 qubits. A modo de comparación, merece la pena recordar que en 2016 no superaban la decena. Otras compañías del sector también han aventurado audaces afirmaciones sobre la potencia y la capacidad de sus equipos.

PRIMEROS PASOS

Hasta el momento hemos extendido el uso de ordenadores cuánticos a la modelización de las energías relacionadas con el estado fundamental y los estados excitados de sistemas moleculares. Este tipo de cálculos nos permitirá explorar diversos mecanismos de reacción, así como moléculas que reaccionan a la luz. Además, los hemos empleado para modelizar el momento dipolar de moléculas pequeñas: un paso encaminado a entender cómo se distribuyen los electrones entre los átomos en un enlace químico, lo que también puede decirnos algo sobre cómo reaccionarán dichas moléculas.

De cara al futuro, hemos empezado a sentar las bases para modelizar nuevos sistemas químicos usando ordenadores cuánticos, y hemos investigado varios cálculos que ya pueden resolverse en los ordenadores cuánticos actuales. Por ejemplo, ¿qué ocurre cuando existe un electrón desapareado en el sistema? Ello suma espín a la molécula, lo que complica los cálculos. ¿Cómo podemos ajustar el algoritmo para que concuerde con los resultados esperados? Esta labor nos permitirá algún día estudiar especies radicales (moléculas con electrones desapareados) que entrañan especial dificultad a la hora de analizarlas en el laboratorio o de simularlas con métodos clásicos.

Sin duda, este trabajo podría reproducirse en ordenadores clásicos. No obstante, nada de ello habría sido posible con la tecnología cuántica que existía hace cinco años. Los avances recientes hacen pensar que la computación cuántica actuará como un potente catalizador de descubrimientos químicos en los próximos años.

No imagino un futuro en el que los químicos se limiten a ejecutar algoritmos en un dispositivo cuántico y obtengan datos precisos que conduzcan a hallazgos inmediatos en el laboratorio. Pero lo que sí es factible —y tal vez incluso pueda conseguirse ya— es incorporar los modelos cuánticos como una etapa más en los procesos existentes, que hoy por hoy dependen de ordenadores tradicionales. En esta estrategia empleamos métodos clásicos para la parte del modelo más exigente desde el punto de vista computacional, lo que puede incluir una enzima, cadenas de polímeros o superficies metálicas. A continuación aplicamos un método cuántico para modelizar algunas interacciones, como la química en el centro activo de la enzima, las interacciones explícitas entre una molécula de disolvente y una cadena de polímero, o los enlaces de hidrógeno en una molécula pequeña. Aún sería necesario hacer aproximaciones en ciertas partes del modelo, pero alcanzaríamos una precisión mayor en los aspectos más característicos de la reacción.

Hoy ya se han logrado importantes progresos al estudiar la posibilidad de integrar el cálculo cuántico de la estructura electrónica en un entorno computacional clásico. Esta estrategia presenta numerosas aplicaciones prácticas. Un avance más rápido en el estudio de las cadenas de polímeros podría ayudar a abordar el problema de la contaminación plástica, que se ha agudizado desde que China restringió las importaciones de material reciclable. En EE.UU., los costes energéticos del reciclaje se mantienen en niveles relativamente altos. Si lográsemos desarrollar plásticos más fáciles de reciclar, podríamos disminuir la cantidad de residuos. En otros ámbitos, la necesidad de producir materiales con menos emisiones de carbono resulta cada vez más apremiante, y la posibilidad de fabricar combustible para aviones, hormigón y otras sustancias con una huella de carbono menor se antoja crucial para recortar las emisiones globales.

La próxima generación de químicos que surja de las universidades de todo el mundo dispondrá de una cantidad de datos que habría sido inimaginable en la primera década del siglo xxi. Sin embargo, la facultad para manipular dichos datos se ve limitada por factores físicos: los ordenadores con una arquitectura clásica son sencillamente incapaces de manejar la complejidad de sustancias tan comunes como la cafeína. En tal caso, no hay cantidad de datos que permita eliminar la necesidad de serendipia: siempre necesitaremos tener suerte para lograr avances importantes. No obstante, si los futuros químicos adoptan el uso de ordenadores cuánticos, es probable que acaben teniendo una suerte mucho mayor.

PARA SABER MÁS

Hartree-Fock on a superconducting qubit quantum computer. Googe AI Quantum et al. en *Science*, vol. 369, págs. 1084-1089, 28 de agosto de 2020.
Computational investigations of the lithium superoxide dimer rearrangement on noisy quantum devices. Qi Gao et al. en *Journal of Physical Chemistry A*, vol. 125, págs. 1827-1836, febrero de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Mundos cuánticos simulados. Oliver Morsch e Immanuel Bloch en *IyC*, mayo de 2015.
Simular la dinámica molecular mediante fotones. Fabien Gatti en *IyC*, febrero de 2019.
El ordenador cuántico de Google logra un hito en química. Neil Savage en www.investigacionyciencia.es, 11 de septiembre de 2020.



SEGURIDAD

Armas hipersóni

La aerodinámica sugiere que los misiles hipersónicos no estarán a la altura de las grandes expectativas que habían generado

David Wright y Cameron Tracy

Ilustración de Brian Stauffer

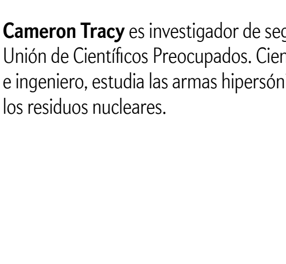


EN SÍNTESIS

Las armas hipersónicas, misiles que podrían maniobrar y volar grandes distancias a más de cinco veces la velocidad del sonido, han desatado una nueva carrera armamentista y avivado el riesgo de un conflicto global.

Los partidarios de esas armas ensalzan su rapidez, maniobrabilidad y sigilo, que parecen hacerlas casi invulnerables a los escudos antimisiles.

Pero un análisis aerodinámico sugiere que el entusiasmo en torno a las armas hipersónicas es exagerado: aunque pueden ofrecer ventajas frente a los misiles tradicionales, no supondrán una revolución.



David Wright es investigador afiliado al Laboratorio de Seguridad y Política Nuclear del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Fue codirector del Programa de Seguridad Global de la Unión de Científicos Preocupados.

Cameron Tracy es investigador de seguridad global en la Unión de Científicos Preocupados. Científico de materiales e ingeniero, estudia las armas hipersónicas y la gestión de los residuos nucleares.

En 2018, en un discurso televisado ante la Asamblea Federal de Rusia, el presidente Vladimir Putin anunció una escalada en la carrera armamentista con Estados Unidos, que se había retirado del Tratado de Misiles Antibalísticos en 2002. Tras abandonar el acuerdo sobre el control de armas, vigente durante décadas, EE.UU. había empezado a construir una red defensiva para interceptar misiles balísticos de largo alcance, y eso amenazaba la capacidad disuasoria de Rusia frente a posibles ataques. Según aseguró ante su audiencia, Putin había advertido a los estadounidenses de que Rusia se vería obligada a responder a tal despliegue, pero no habían querido escuchar. «¡Que escuchen ahora!»

Putin desveló que Rusia estaba desarrollando armas hipersónicas: misiles capaces de cubrir largas distancias a través de la atmósfera a más de cinco veces la velocidad del sonido, es decir, por encima de mach 5. (Mach 1 representa la velocidad local del sonido; las velocidades comprendidas entre mach 1 y mach 5 son supersónicas, y las que sobrepasan mach 5, hipersónicas.) Según el presidente ruso, uno de esos misiles, un planeador llamado Avangard, era muy maniobrable y podía recorrer miles de kilómetros con una velocidad inicial superior a mach 20. Y eso lo haría «totalmente invulnerable a cualquier sistema de defensa antiaérea o antimisiles».

El anuncio de Putin, que vino acompañado de intimidantes simulaciones de los misiles serpenteando alrededor del globo a velocidades inverosímiles, añadió más leña al fuego de una nueva y peligrosa carrera armamentista. Los artefactos implicados se ensalzan no solo por su velocidad, sino también por su sigilo y maniobrabilidad. Los misiles balísticos intercontinentales, que siguen una trayectoria elíptica hasta el espacio antes de precipitarse sobre su objetivo, llegan a superar mach 20. Sin embargo, su posición es predecible durante buena parte del vuelo y solo pueden maniobrar brevemente tras su reentrada en la atmósfera. En cambio, las armas hipersónicas surcarían las capas inferiores de la atmósfera casi todo el tiempo, y se valdrían de la sustentación generada por el flujo de aire para zigzaguear y tratar de burlar a los cohetes interceptores. Al aproximarse a baja altura, los radares terrestres no las detectarían hasta que estuvieran cerca del blanco, y sería más difícil detenerlas.

Un informe elaborado por oficiales del ejército estadounidense tras el discurso de Putin concluía que las armas hipersónicas, que China también persigue, «revolucionarían las guerras». El Pentágono, que llevaba una década y media trabajando en proyectos similares, redobló sus esfuerzos; y el año pasado el Congreso de EE.UU. destinó unos 3200 millones de dólares a la investigación y el desarrollo de armas y defensas hipersónicas. Por su parte, Rusia y China aseguran que ya han desplegado sistemas de este tipo. Los partidarios de estas armas sostienen que son increíblemente rápidas y ágiles, y casi invisibles.

Los autores de este artículo disentimos. Formamos parte de una pequeña pero dinámica comunidad de físicos e ingenieros de todo el mundo consagrados al estudio de los nuevos sistemas de armamento, a fin de entender sus posibles repercusiones sobre la seguridad global. Se trata de una tradición arraigada que se remonta a los participantes en el Proyecto Manhattan y a científicos rusos como Andréi Sájarov, quienes buscaban mitigar el peligro de las armas nucleares que habían ayudado a crear. Como investigadores, recabamos toda la información posible sobre esas tecnologías normalmente secretas, la analizamos y compartimos los resultados con la sociedad.

Nuestros estudios indican que las armas hipersónicas podrían presentar ventajas en determinadas situaciones, pero en ningún caso supondrán una revolución. Muchas de las afirmaciones sobre ellas son exageradas o directamente falsas. Aun así, la percepción generalizada de que las armas hipersónicas marcarán un punto de inflexión ha avivado las tensiones entre EE.UU., Rusia y China. Y eso ha desatado una nueva carrera armamentista e incrementado el riesgo de conflicto.

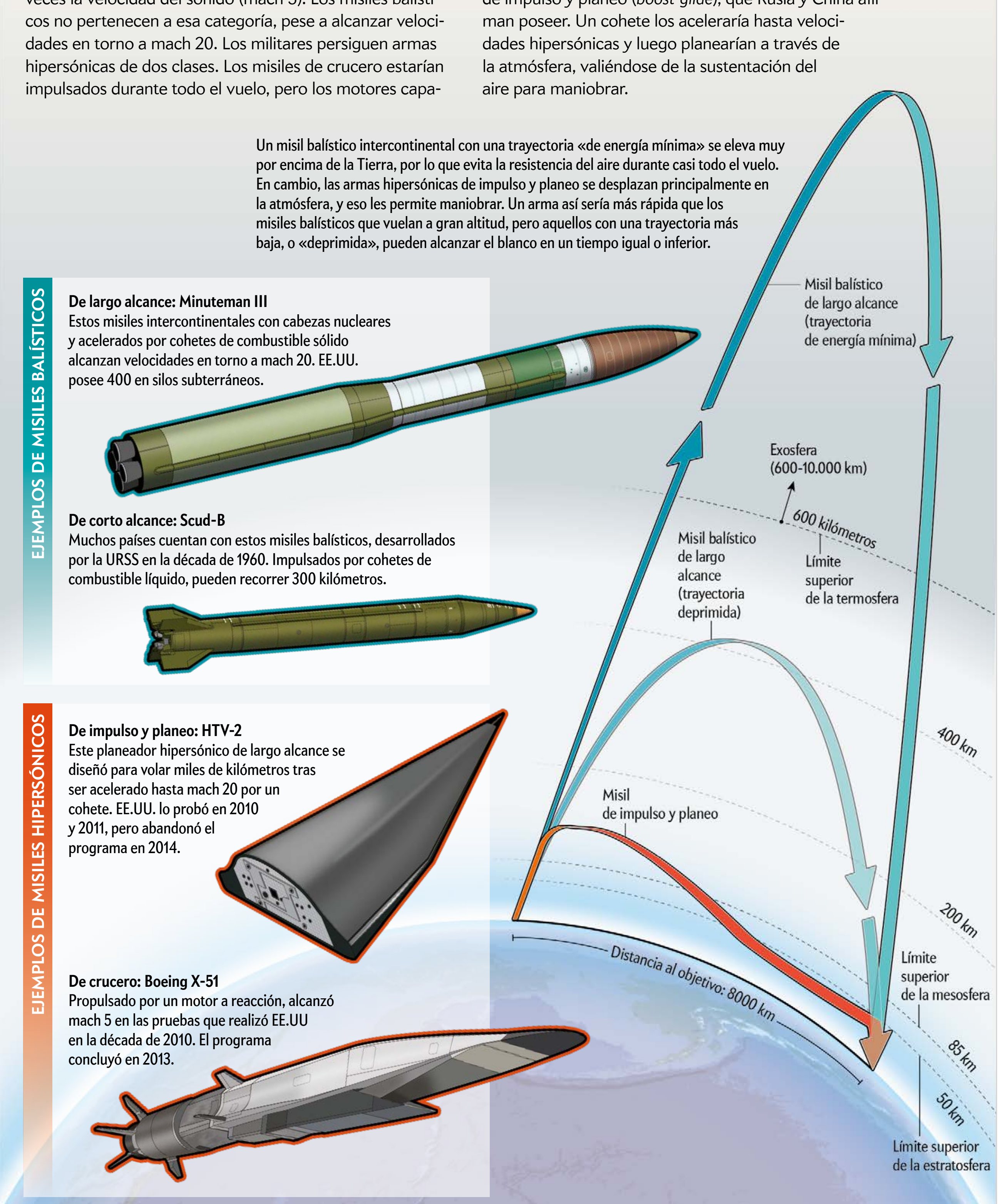
VAIVENES

La industria militar lleva casi un siglo en pos de los aviones hipersónicos, aunque con escaso éxito. A finales de la década de 1930, el ingeniero austriaco Eugen Sänger y la física alemana Irene Bredt diseñaron la primera aeronave de ese tipo, un planeador llamado Silbervogel. Estaba previsto que se lanzara desde un cohete, realizara casi todo el vuelo en la atmósfera y, como cualquier otro planeador, se mantuviera en el aire gracias a la sustentación aerodinámica. Sin embargo, los estrategas nazis decidieron que su fabricación sería demasiado compleja y costosa.

Continúa en la página 85

El régimen hipersónico

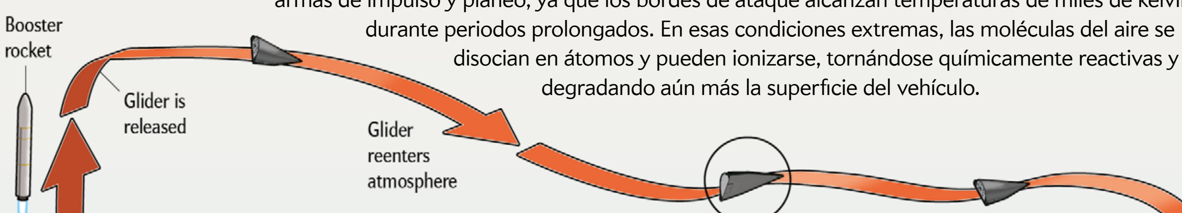
Los misiles hipersónicos son vehículos armados que pueden maniobrar y volar grandes distancias a más de cinco veces la velocidad del sonido (mach 5). Los misiles balísticos no pertenecen a esa categoría, pese a alcanzar velocidades en torno a mach 20. Los militares persiguen armas hipersónicas de dos clases. Los misiles de crucero estarían impulsados durante todo el vuelo, pero los motores capaces de acelerarlos hasta más de mach 5 aún se hallan en fase de desarrollo. El otro tipo son los vehículos de impulso y planeo (*boost-glide*), que Rusia y China afirman poseer. Un cohete los aceleraría hasta velocidades hipersónicas y luego planearían a través de la atmósfera, valiéndose de la sustentación del aire para maniobrar.



BEN GILLILAND

El problema de la resistencia aerodinámica

Un objeto que atraviesa un fluido experimenta una fuerza de arrastre proporcional al cuadrado de su velocidad. Esa resistencia supone un gran obstáculo para los vuelos hipersónicos, al frenar los planeadores y dificultar sus maniobras. Además, reduce la energía cinética del vehículo, convirtiéndola en ondas de choque y energía térmica del aire circundante. El intenso calentamiento amenaza la integridad de las armas de impulso y planeo, ya que los bordes de ataque alcanzan temperaturas de miles de kelvin durante periodos prolongados. En esas condiciones extremas, las moléculas del aire se disocian en átomos y pueden ionizarse, tornándose químicamente reactivas y degradando aún más la superficie del vehículo.



ARMAS DE IMPULSO Y PLANEO

Estos vehículos hipersónicos son acelerados por un cohete a velocidades en torno a mach 20, tras lo cual planean hasta su objetivo. Como otros planeadores, usan la sustentación que genera el flujo de aire para mantenerse en vuelo y maniobrar. Sin embargo, poseen un momento tan enorme que pierden mucha velocidad y alcance al cambiar de dirección.

High-temperature, dissociated and possibly ionized air

Heat transfer

Extreme heat

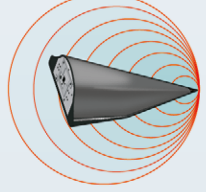
Shock wave is close to the body (thin layer)

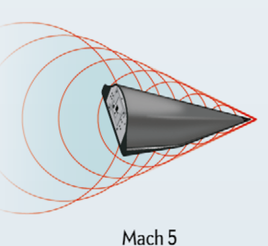
Turbulent boundary layer (*orange*)

ONDAS DE CHOQUE

Un avión que supera la velocidad del sonido (mach 1) genera una onda de choque, una capa de aire denso en movimiento. A velocidades hipersónicas, el frente de onda forma un ángulo muy pequeño con la dirección del movimiento. Entre el vehículo y la onda de choque queda una región estrecha con aire muy rápido, muy caliente y químicamente inestable.

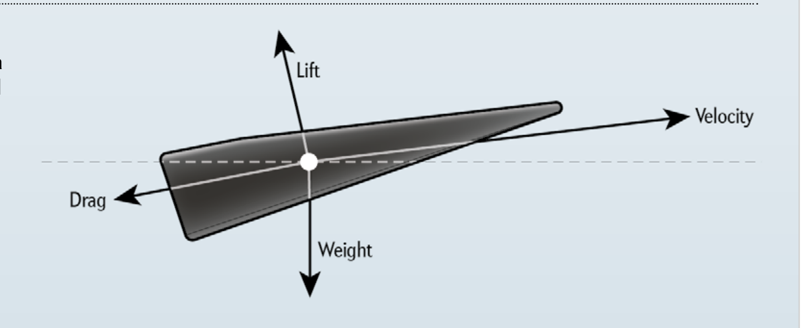






SUSTENTACIÓN Y RESISTENCIA

Los aviones se mantienen en el aire y maniobran gracias a la sustentación (*S*), una fuerza perpendicular a la dirección del movimiento. Aunque la sustentación aumenta con el cuadrado de la velocidad, también lo hace la resistencia aerodinámica (*R*). El cociente *S/R* es un indicador clave del desempeño de una aeronave, pero es muy difícil diseñar aparatos hipersónicos con valores elevados. En los aviones comerciales, *S/R* se sitúa en torno a 20, pero el HTV-2, un prototipo hipersónico que EE.UU. probó a principios de la década de 2010, solo llegó a 2,6.



FUENTE: «SUPERSONIC COMBUSTION IN AIR-BREATHING PROPULSION SYSTEMS FOR HYPERSONIC FLIGHT», JAVIER URZAY EN *ANNUAL REVIEW OF FLUID MECHANICS*, VOL. 50, PÁGS. 593-627, ENERO DE 2018 (*física del flujo de aire*); BEN GILLILAND (*ilustración*)

Viene de la página 82

Durante la Segunda Guerra Mundial, los ingenieros alemanes desarrollaron los motores cohete, que queman propelente (una mezcla de combustible y un oxidante químico) para generar un intenso brote de energía. En las décadas siguientes, los prototipos de aviones propulsados por cohetes fueron batiendo un récord de velocidad tras otro. Así, en octubre de 1947, el X-1 se convirtió en la primera aeronave pilotada en romper de manera oficial la barrera del sonido, y en los años sesenta el X-15 alcanzó mach 6,7 durante los vuelos de prueba. Sin embargo, las intensas aceleraciones de los motores cohete resultan muy exigentes para la fisiología humana, por lo que ese tipo de aviones nunca pasaron de meros experimentos. No obstante, los cohetes permitieron a Estados Unidos y a la Unión Soviética construir arsenales de misiles balísticos con cabezas nucleares capaces de volar a más de mach 20 y de atravesar océanos.

Otro invento de esa época, el motor a reacción, se convirtió en la base de los viajes militares y comerciales. Al usar el oxígeno atmosférico para quemar el combustible de manera continua, estos motores no necesitan cargar con el peso adicional de un oxidante. Gracias a ello, ofrecen maniobrabilidad y transporte a grandes distancias sin la aceleración extrema de los motores cohete. La mayor velocidad a la que ha volado oficialmente un reactor pilotado se sitúa en torno a mach 3, un récord establecido por el Lockheed SR-71 Blackbird en julio de 1976. Los motores a reacción también propulsan los misiles de crucero: aeronaves maniobrables y no tripuladas que pueden alcanzar velocidades supersónicas.

Entretanto, los planeadores hipersónicos continuaban elevándose... y cayendo. En 1963, tras invertir el equivalente a más de 5000 millones de dólares actuales en la construcción de la aeronave X-20 Dyna-Soar, EE.UU. abandonó el diseño. Pero tras los atentados del 11 de septiembre de 2001, el presidente George W. Bush ordenó desarrollar misiles hipersónicos con cabezas no nucleares capaces de desbaratar con rapidez y precisión actividades terroristas en otros continentes. (Aunque los misiles balísticos servirían a tal fin, su lanzamiento podría confundirse con un ataque nuclear y desencadenar una guerra.)

Además, Bush se retiró del Tratado de Misiles Antibalísticos que EE.UU. y la URSS habían firmado en 1972. El acuerdo había evitado que las potencias rivales erigieran sistemas defensivos contra los misiles balísticos del bando contrario, y con ello había atajado una carrera tecnológica por construir escudos antimisiles y atravesar los del adversario. Pero la administración Bush procedió a desarrollar y desplegar interceptores para protegerse de los misiles balísticos de largo alcance. Por temor a que su capacidad de disuadir un ataque nuclear estadounidense se viera comprometida, Rusia y más tarde China empezaron a explorar posibles formas de superar el escudo estadounidense. Los dispositivos más recientes que podrían lograrlo son los misiles hipersónicos, que vuelan demasiado bajo para que los interceptores actuales los detengan. En resumen, los atentados del 11-S propiciaron una serie de decisiones precipitadas, que han llevado a las tres superpotencias a una carrera por construir armas hipersónicas de distintos tipos y con diversos fines.

RESISTENCIA Y SUSTENTACIÓN

Los sistemas hipersónicos que se implementarán a corto plazo serán armas de «impulso y planeo» (*boost-glide*), las cuales usan un cohete para acelerar y luego recorren largas distancias planeando sin propulsión. (Varios países también buscan construir misiles de crucero hipersónicos, pero sus motores aún se hallan en fase de desarrollo.) Sin embargo, nuestros estudios indican que los planeadores hipersónicos se encuentran en serias dificultades: la física se interpone en su camino.

Los diseñadores de vehículos hipersónicos se enfrentan a un adversario formidable: el arrastre o resistencia que ofrece un fluido a cualquier cuerpo que se mueve a través de él. Esa fuerza es proporcional al cuadrado de la velocidad del objeto que se desplaza, por lo que afecta especialmente a los vuelos hipersónicos. A mach 5, por ejemplo, un planeador experimenta una resistencia aerodinámica 25 veces mayor que a mach 1, y a mach 20, una 400 veces mayor que a mach 1.

La pérdida de energía que sufre una aeronave al empujar las moléculas de aire es aún más grave: aumenta con el cubo de la velocidad. Así, un planeador que vuele a mach 5 perderá energía 125 veces más rápido que a mach 1, y uno que vaya a mach 20 la perderá 8000 veces más deprisa. Otro problema es que la energía cinética transferida al aire circundante se convierte en energía térmica y ondas de choque. Parte de ella retorna al vehículo en forma de calor: los bordes de ataque de las armas de impulso y planeo que vuelan a más de mach 10 pueden alcanzar temperaturas superiores a los 2000 kelvin durante períodos prolongados. Proteger un vehículo de ese intenso calor es uno de los mayores retos que afrontan los ingenieros.

Al mismo tiempo, cualquier planeador debe generar sustentación —una fuerza perpendicular a la dirección del movimiento— para mantenerse en el aire y poder girar. (El viraje se consigue alabeando el aparato o induciendo de algún otro modo una componente horizontal de la sustentación.) La sustentación es asimismo proporcional al cuadrado de la velocidad, y los procesos aerodinámicos que la causan también generan resistencia. La relación S/R (o L/D, si usamos las iniciales en inglés) entre las fuerzas de sustentación S y resistencia aerodinámica R es un indicador clave del rendimiento de un planeador.

Los vehículos hipersónicos alcanzan valores de S/R mucho más bajos que los de las aeronaves habituales. En los aviones subsónicos, ese cociente puede ser mayor que 15. Sin embargo, tras decenios de investigación y desarrollo, las armas hipersónicas probadas en la última década parecen tener valores de S/R inferiores a 3. Eso denota una escasa sustentación y una elevada resistencia, lo cual limita la velocidad y el alcance de los aviones hipersónicos, reduce su maniobrabilidad y aumenta su calentamiento superficial.

Por si fuera poco, las propiedades físicas y químicas del aire que fluye a lo largo de un objeto cambian radicalmente a velocidades hipersónicas. A temperaturas de miles de grados, el aire circundante se disocia: el oxígeno molecular se convierte en átomos libres que pueden ionizarse y erosionar la superficie del vehículo. Y aun si el misil sobreviviese a este proceso, el calentamiento produciría una brillante señal infrarroja detectable para los satélites.

NO ES ORO TODO LO QUE RELUCE

A principios de la década de 2010, EE.UU. realizó pruebas de vuelo con un planeador de largo alcance: el Vehículo de Tecnología Hipersónica 2 (HTV-2, por sus siglas en inglés), concebido para recorrer hasta 7600 kilómetros después de que un cohete le confiriera una velocidad inicial de mach 20. Hemos combinado los datos de esos ensayos con información adicional sobre el aparato para llevar a cabo simulaciones por ordenador del vuelo hipersónico. También hemos comparado el desempeño de los vehículos de impulso y planeo con el de otros dispositivos tradicionales, como los misiles balísticos o de crucero, en los tres

aspectos donde se supone que sobresalen las armas hipersónicas: tiempo de vuelo, maniobrabilidad y sigilo.

A menudo se dice que las armas hipersónicas disminuyen el tiempo necesario para alcanzar el blanco, pero esa afirmación se basa sobre todo en una comparación errónea con los misiles de crucero subsónicos o con los misiles balísticos con trayectorias largas. La trayectoria de energía mínima (la más eficiente desde el punto de vista energético) de un misil balístico es aquella donde la ojiva se eleva muy por encima de la superficie terrestre antes de precipitarse sobre el objetivo. De ese modo evita la resistencia de la atmósfera durante la mayor parte del vuelo, pero recorre mucha más distancia que un planeador hipersónico y puede tardar más en llegar a su destino.

Sin embargo, los misiles balísticos también pueden volar a menor altitud, describiendo una trayectoria «deprimida». Esta se considera una forma rápida de lanzar ataques nucleares desde submarinos. Tal trayectoria sería mucho más corta que la de energía mínima, y la ojiva también evitaría las fuerzas de arrastre durante casi todo el vuelo. En cambio, los planeadores hipersónicos pasan mucho más tiempo en la atmósfera, donde la resistencia del aire los ralentiza. Nuestros cálculos muestran que el tiempo de vuelo de un misil balístico con una trayectoria deprimida puede ser igual o menor que el de un arma hipersónica con el mismo alcance.

La maniobrabilidad es otra ventaja muy publicitada de las armas hipersónicas, pero EE.UU. lleva decenios desarrollando y probando vehículos de reentrada maniobrables (VRM) para sus misiles balísticos. Se trata de ojivas que usan las fuerzas aerodinámicas para cambiar de rumbo mientras se acercan al objetivo, lo cual aumenta su precisión y las ayuda a sortear las defensas antimisiles. Así pues, la capacidad de maniobra no es exclusiva de las armas hipersónicas. Es cierto que los VRM suelen virar solo al final del vuelo: no pueden serpentear durante todo el recorrido, como los planeadores hipersónicos. Pero la maniobrabilidad de estos se ve limitada por las enormes fuerzas requeridas para desviar un vehículo que viaja a tamañas velocidades.

Para cambiar de dirección, un planeador hipersónico ha de lograr que las fuerzas de sustentación le confieran una velocidad horizontal, la cual también podría tener que ser hipersónica. Así, para virar 30 grados, un planeador que vuele a mach 15 (unos 4,5 kilómetros por segundo) debería generar una velocidad horizontal de mach 7,5. Al mismo tiempo, el planeador debe conservar la suficiente sustentación vertical para mantenerse en el aire. Tales maniobras pueden reducir mucho la velocidad y el alcance.

A fin de generar la sustentación adicional necesaria para cambiar de rumbo, el vehículo podría descender y aprovechar el mayor empuje del aire más denso. Tras efectuar el viraje, volvería a elevarse para proseguir el vuelo con menor resistencia. Al perder altitud giraría más rápido, pero también experimentaría un mayor arrastre. Por ejemplo, a mach 15, un planeador como el HTV-2 volaría a unos 40 kilómetros de altitud. Si bajara unos 2,5 kilómetros, tardaría en torno a 7 minutos en virar 30 grados, y en ese tiempo trazaría un arco de unos 4000 kilómetros de radio. La resistencia adicional que supone volar en un aire más denso, incluso durante un período tan breve, haría que el planeador perdiese una velocidad equivalente a mach 1,3 y unos 450 kilómetros de alcance con respecto a los 3000 que podría haber recorrido.

Maniobrar a mitad de trayecto, por ejemplo para elegir un nuevo objetivo, puede ser útil, y es probable que los planeadores hipersónicos superen a los VRM en este aspecto. Aun así, estos ya pueden hacer maniobras de varios cientos de kilómetros durante la reentrada, así que esta propiedad de las armas hipersónicas tampoco parece demasiado revolucionaria.

Otra afirmación habitual es que los planeadores, al viajar a baja altitud, serían casi invisibles para los sistemas de alerta temprana. Un radar terrestre puede detectar una ojiva que vuele a 1000 kilómetros sobre la superficie desde una distancia de unos 3500 kilómetros. Pero, debido a la curvatura de la Tierra, un objeto que viajara a 40 kilómetros de altura permanecería inadvertido hasta que se hallase a tan solo unos 500 kilómetros del radar. No obstante, los satélites de alerta temprana de países como EE.UU. o Rusia poseen sensores infrarrojos que podrían captar la intensa luz que emiten los planeadores debido a sus temperaturas extremas. Nuestro análisis indica que esos satélites serían capaces de identificar y rastrear un planeador para la mayoría de velocidades hipersónicas.

Los vehículos que volasen en el extremo inferior de ese intervalo, por debajo de mach 6, sí podrían pasar inadvertidos. Esa inquietud parece haber motivado algunas investigaciones sobre nuevas constelaciones de sensores satelitales. Pero un vehículo de impulso y planeo similar al HTV-2 con una velocidad inicial de mach 5,5 recorrería menos de 500 kilómetros, así que volar «tan despacio» limitaría mucho su alcance. Aunque es factible que los misiles de crucero hipersónicos lograsen mantener esas velocidades durante largas distancias, eso podría invalidar otro argumento a favor de las armas hipersónicas: su capacidad de sortear las defensas terminales.

Rusia y China parecen estar desarrollando armas hipersónicas sobre todo por su potencial para eludir el escudo antimisiles estadounidense. La Defensa Terrestre Intermedia y el sistema naval Aegis SM-3, que protegen a EE.UU., Japón y otros países, interceptan misiles más allá de la atmósfera y no podrían lidiar con armas hipersónicas que volasen a menor altitud. Un planeador hipersónico lo bastante rápido y maniobrable también burlaría las defensas de corto alcance que operan en la atmósfera,





EL PLANEADOR HTV-2 (*arriba*), con forma de punta de flecha y visto poco antes de desprenderse de su cohete, no funcionó según lo previsto en las pruebas que realizó EE.UU. en 2010 y 2011. Un cohete propulsor (*abajo*) lanza otro planeador hipersónico que está desarrollando el Pentágono a partir de un diseño cónico de los años setenta.

VOLGI ARCHIVE/ALAMY STOCK PHOTO (*planeador*); OSCAR SOSA Y ARMADA DE EE.UU. (*cohete*)

como los sistemas Patriot, SM-2 y THAAD de EE.UU. Estos protegen regiones de unas decenas de kilómetros en torno a buques y bases militares, empleando la sustentación para virar e interceptar las armas enemigas. Su eficacia depende de que sean más maniobrables que el misil que intentan abatir, lo cual está muy relacionado con la velocidad de vuelo. Los misiles Patriot, por ejemplo, emplean cohetes propulsores para adquirir velocidades de hasta mach 6. Un arma hipersónica podría esquivarlos mientras mantuviera una velocidad elevada, pero sería vulnerable cuando volase más lento que ellos. Así pues, casi en el mismo momento en que se tornara invisible para los satélites (aunque posiblemente visible para los radares terrestres), un planeador hipersónico devendría susceptible de ser interceptado.

Además, la capacidad de superar los escudos defensivos no es exclusiva de los planeadores hipersónicos. Los interceptores que operan fuera de la atmósfera son especialmente vulnerables a los señuelos y otras contramedidas que Rusia y China ya han desarrollado y seguramente implementado. Los misiles balísticos de corto y medio alcance, lanzados desde un avión, podrían volar tan bajo como para eludir esas defensas exoatmosféricas. Del mismo modo, equipar los misiles balísticos (incluidos los de corto y medio alcance) con VRM podría permitirles esquivar y atravesar las defensas que operan en la atmósfera.

Estados Unidos ha pasado a centrarse en el desarrollo de armas hipersónicas de menor alcance, que podrían cubrir hasta unos pocos miles de kilómetros. Esta decisión parece motivada no solo por los problemas que exhibió el prototipo de planeador HTV-2 en los vuelos de prueba, sino también por un nuevo objetivo: el empleo de armas en conflictos locales para penetrar y destruir los sistemas defensivos. Sin embargo, esos planeadores hipersónicos poseen capacidades casi idénticas a las de los misiles balísticos con VRM que siguen trayectorias deprimidas. Esas semejanzas quedaron patentes en 2018, cuando el Departamento de Defensa de EE.UU. anunció el diseño elegido para un vehículo hipersónico que usarán las fuerzas armadas de ese país. En vez de optar por una forma de cuña como la del HTV-2, que incrementaría el valor de la relación S/R, escogieron un diseño cónico más antiguo basado en un VRM experimental concebido en la década de 1970. Esta arma tendría menor alcance y maniobrabilidad, pero la tecnología conlleva menos riesgos.

Un diseño de los años setenta tiene poco de revolucionario. Da la impresión de que el Pentágono está aprovechando la popularidad de las armas hipersónicas para asegurarse la financiación del Congreso, mientras retoma una tecnología desarrollada hace medio siglo para su programa principal. Aunque destinan parte de los fondos a otros diseños, su atención no se centra en los innovadores sistemas que se habían anunciado.

ANÁLISIS IMPARCIALES

Un aumento significativo del valor de S/R reduciría los obstáculos técnicos a los que se enfrentan los vehículos hipersónicos de largo alcance. En teoría, los diseños «*waverider*» («jinete de las ondas») pueden permitir que esas aeronaves alcancen cocientes S/R de 6 o más: su forma de cuña se ajusta al patrón de la onda de choque que envuelve al planeador a una cierta velocidad y altitud, de modo que parte de la onda de choque queda atrapada bajo el vehículo y ofrece sustentación adicional.

La idea data de finales de los años cincuenta, pero ha resultado difícil de llevar a la práctica. De hecho, el HTV-2 se basaba en un diseño de ese tipo y su relación S/R era de tan solo 2,6. Aun así, en 2020 la Fuerza Aérea de EE.UU. se retiró del programa hipersónico que desarrollaba junto al Pentágono y anunció que perseguiría un planeador de corto alcance con un diseño en cuña como el del HTV-2. Incrementar S/R hasta 4 o 6 reduciría la carga térmica y ampliaría el alcance del planeador. Pero ¿abriría eso nuevas posibilidades en el terreno militar?

Creemos que no. El calentamiento sigue suponiendo un reto, ya que la temperatura superficial de un vehículo cae bastante despacio al aumentar S/R. Según nuestros cálculos, si el valor de esa relación pasara de 2,6 (el que logró el HTV-2) a 6, la temperatura superficial de un planeador a una velocidad dada disminuiría a lo sumo en un 15 por ciento. Por tanto, seguiría siendo difícil prevenir los daños durante los vuelos de largo alcance. Ese incremento de S/R también reduciría la emisión infrarroja del misil, que podría volar a velocidades de hasta mach 7 sin ser detectado (por los satélites actuales). Además, le conferiría algo más de maniobrabilidad, aunque una manera más sencilla de mejorar ese aspecto sería aumentar ligeramente la velocidad inicial del vehículo. (Recordemos que la maniobrabilidad depende de la sustentación, que es proporcional al cuadrado de la velocidad.) Por todo ello, no parece que los avances esperables en los planeadores hipersónicos, como un aumento de S/R, vayan a dotarlos de capacidades revolucionarias.

Pese a ello, el entusiasmo desmedido que rodea a las armas hipersónicas ha disparado la inversión en estos sistemas y ha acentuado el miedo, la desconfianza y el riesgo de conflicto entre EE.UU., Rusia y China. Aun si es exagerada, la perspectiva de sufrir un ataque rápido y potencialmente indetectable podría hacer que esos países reaccionaran de forma precipitada a una señal de alarma (real o ficticia) y cometiesen un error garrafal.

Al difundir análisis técnicos de los nuevos sistemas militares, los científicos e ingenieros independientes pretendemos ayudar a la sociedad y a los responsables políticos a tomar decisiones acertadas. Pero cada vez somos menos. Aunque los fondos para el diseño y la construcción de nuevas armas parecen inagotables, los recursos para la investigación imparcial de sus capacidades y repercusiones no dejan de menguar. Y eso supone una barrera abrumadora para los jóvenes investigadores interesados en este campo. No obstante, creemos que los estudios objetivos y fundamentados que aportamos son cruciales y deberían tenerse en cuenta. Los responsables políticos han de dejar a un lado el bombo publicitario y llevar a cabo un análisis minucioso, realista y técnicamente riguroso de los posibles costes y beneficios de las armas hipersónicas. De lo contrario, nos veremos abocados al despilfarro y a un aumento de la amenaza global. IyC

PARA SABER MÁS

Supersonic combustion in air-breathing propulsion systems for hypersonic flight. Javier Urzay en *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 50, págs. 593-627, enero de 2018.

Armas hipersónicas: El sistema armamentístico de la nueva era. Debalina Ghoshal. Documento de Opinión n.º 98/2018 del Instituto Español de Estudios Estratégicos, septiembre de 2018.

Cool your jets: Some perspective on the hyping of hypersonic weapons. Ivan Oelrich en *Bulletin of the Atomic Scientists*, vol. 76, págs. 37-45, enero de 2020.

Modeling the performance of hypersonic boost-glide missiles. Cameron L. Tracy y David Wright en *Science & Global Security*, vol. 28, págs. 135-170, enero de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Brechas en la defensa antimisil. Richard L. Garwin en *IyC*, enero de 2005.

Reactores para un avión espacial. Thomas A. Jackson en *IyC*, octubre de 2006.

El enigma de la sustentación aerodinámica. Ed Regis en *IyC*, mayo de 2020.

por H. Joachim Schlichting



H. Joachim Schlichting es exdirector del Instituto de Didáctica de la Física de la Universidad de Münster.

El curioso comportamiento del kétchup

Esta salsa de tomate es un fluido no newtoniano. Según las fuerzas mecánicas que se le apliquen, podrá ser más o menos espesa

Todos sabemos lo que cuesta sacar el kétchup de los frascos de vidrio, incluso cuando aún queda bastante. Es cierto que todos los alimentos líquidos dejan restos adheridos al recipiente, desde el vino tinto hasta el aceite de oliva. Ello se debe tanto a la capacidad del fluido de mojar a la superficie como a la viscosidad de la sustancia, y por lo general solo afecta a una capa delgada de esta.

En el caso del kétchup, sin embargo, siempre cuelgan gruesos pegotes de la pared interior del frasco. Si nos limitamos a inclinar o incluso a poner la botella boca abajo, solo saldrá algo de salsa si aún está casi llena. Sin embargo, el kétchup es muy fácil de extender y untar una vez que se encuentra en el plato. ¿A qué se debe este comportamiento?

Esta espesa salsa de tomate solo se vuelve fluida cuando agitamos enérgicamente el frasco o lo golpeamos con la mano. Y si no tenemos cuidado, acabará aterrizando sobre la comida mucho más kétchup del que pretendíamos. Pero los consumidores experimentados saben que no hay que apresurarse después de las sacudidas, puesto que la salsa tarda un cierto tiempo en ponerse en movimiento. Así que uno puede agitar la botella con la tapa puesta y, a continuación, abrirla tranquilamente y apuntar al objetivo.

Estas molestias nos llevan a preguntarnos por qué los fabricantes no han puesto aún remedio al problema. La respuesta es sencilla: el kétchup está diseñado para presentar justamente ese comportamiento. Y no con el ánimo de fastidiar a los consumidores, sino porque resulta esencial en muchas situaciones. Por ejemplo, debemos poder aplicar una fina tira de kétchup sobre una salchicha sin que gotee y nos manche la ropa, incluso si hacemos un movimiento brusco al llevarnos el alimento a la boca. Una vez allí, no obstante, la salsa no debe resultar pegajosa ni ofrecer resistencia al masticar. De hecho, casi esperamos que se deshaga en la lengua.

Fluidos no newtonianos

Desde un punto de vista físico, agitar, extender e ingerir kétchup guarda relación con la cizalladura: la deformación que se produce cuando la parte inferior de la salsa (que es viscosa en reposo) se fija a la base sólida sobre la que descansa, ya sea por adherencia o a través de otras fuerzas, mientras las capas superiores se desplazan en paralelo a ella.

En los fluidos «newtonianos», como el agua, la viscosidad es independiente de la fuerza por unidad de superficie que los deforma. Pero en algunos fluidos no newtonianos, entre los que se encuentra el kétchup, la situación es distinta: su viscosidad va disminuyendo al someterlos a fuerzas cada vez más intensas. Por eso, a veces también decimos que experimentan «adelgazamiento por cizalladura».

Los responsables de ese comportamiento son los polímeros que se añaden como espesante a esta salsa compuesta de pasta de tomate, azúcar y otras sustancias. Desde el punto de vista microscópico, los polímeros son moléculas complejas formadas por largas cadenas de átomos. Su tendencia natural es a enredarse entre sí, ya que al hacerlo liberan energía al ambiente. En esa situación, el polímero constituye una sustancia relativamente viscosa. Sin embargo, cuando actúan fuerzas de cizalladura suficientemente intensas, transfieren a las moléculas la energía necesaria para que se estiren y se alineen longitudinalmente. Tras ese cambio estructural, las cadenas se deslizan con facilidad unas sobre otras, lo que macroscópicamente se traduce en una menor viscosidad.

Cuando desaparecen las fuerzas de cizalladura que actúan sobre el kétchup, las moléculas de polímero comienzan a retorcerse de nuevo para liberar energía. Eso lleva un tiempo, lo que explica por qué la salsa no vuelve a solidificarse justo después de la agitación y la consiguiente cizalladura.

Maicena y agua

En nuestro día a día nos encontramos con otras sustancias que presentan adelgazamiento por cizalladura, como el champú. Cuando nos ponemos un poco de champú sobre la palma de la mano, se extiende tan despacio que podemos llevarlo tranquilamente a la cabeza y aplicarlo en el cabello. Y al hacerlo apenas notamos resistencia, ya que el cizallamiento reduce la viscosidad del fluido.

Pero, a pesar de las semejanzas con el kétchup, existe una diferencia crucial entre ambas sustancias: el champú fluye libremente como consecuencia de su propio peso, mientras que eso no suele bastar en el caso del kétchup. Una tira de kétchup sobre una salchicha no se moverá de su sitio. Las pinturas para paredes y los dentífricos, que también son fluidos no newtonianos, permanecen igualmente en el lugar donde se aplican.

Si hay líquidos que reducen su viscosidad como resultado de la deformación por cizalladura, ¿hay otros que la

EL KÉTCHUP tiende a quedarse atascado en el cuello de las botellas de vidrio, incluso cuando están llenas. Pero una vez fuera, es fácil de extender.

aumenten? De hecho, las sustancias que se espesan con la cizalladura, conocidas como «dilatantes», cuentan con un representante bien conocido en nuestros hogares: la pasta que se obtiene al mezclar maicena con agua. La mezcla se puede hacer con relativa comodidad a velocidades moderadas. Pero, si aumentamos el ritmo, la viscosidad crecerá bruscamente, hasta el punto de que la mezcla se volverá tan sólida que la cuchara se quedará atascada.

La mezcla de almidón y agua se comporta de forma parecida a las arenas movedizas, donde los granos de arena están lubricados con agua y, bajo la acción de fuerzas suaves, se deslizan unos sobre otros. Pero la aplicación de una presión repentina desplaza el agua de los intersticios y junta los componentes sólidos, lo cual incrementa drásticamente la resistencia. Al igual que ocurre con la arena, las moléculas de almidón están separadas por una capa de agua. Las fuerzas intensas las ponen en contacto, de manera que la mezcla se aglutina.

Entretanto, la industria ha abordado las molestias relacionadas con el kétchup de un modo creativo: hoy suele venderse en botellas flexibles de plástico. Con solo apretar un poco, la resistencia de la salsa de tomate se torna inútil. Y aunque esto simplifica sobremanera su uso, se pierde el desafío físico y el momento triunfal en que uno consigue aplicar el kétchup sin accidentes. IyC



SI TE INTERESA ESTE TEMA...

Descubre *Ciencia y gastronomía*, un número monográfico de la colección TEMAS con algunos de nuestros mejores artículos sobre la física y la química de los procesos culinarios.





EN NUESTRO ARCHIVO

Maicena y agua, una mezcla exótica. Nathan Collins en www.investigacionyciencia.es, 14 de febrero de 2014.

Slime, el fluido mágico que arrasa entre los jóvenes. Marc Boada en *IyC*, diciembre de 2017.

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



Si el mundo tuviese 100 habitantes

Un ejemplo práctico de cómo acercar la estadística a públicos de toda condición



GETTY IMAGES/WILDPIXEL/ISTOCK

Solemos utilizar la palabra *estadística* con dos significados: para referirnos a una colección de datos («una estadística») o para nombrar la ciencia que trata de inferir regularidades o propiedades de un fenómeno o población («la estadística»). Ambas tienen, en cierto modo, su correlato técnico: la estadística descriptiva y la inferencia estadística, respectivamente.

La estadística descriptiva se dedica a recolectar datos para describir el mundo. Pero las listas de números, «las estadísticas», nos resultan áridas y muchas veces opacas, por lo que la presentación de los datos resulta crucial. Hacer hablar a los números es una mezcla de ciencia, tecnología y arte. En 1990, la ambientóloga Donella Meadows publicó un informe titulado «¿Quién vive en la aldea global?». El término *aldea global* había sido acuñado unas décadas antes por el filósofo y sociólogo Marshall McLuhan para transmitir la idea de un mundo interconectado, y el informe de Meadows resumía el estado de los 5330 millones de seres humanos que poblaban la Tierra en aquel momento.

Ya la propia cifra de 5330 millones queda fuera de nuestra experiencia cotidiana. Sin embargo, Meadows deseaba que la información que podía desprenderse de los datos estadísticos fuera clara y comprensible para el público más amplio posible. De hecho, pensaba en los niños —parece de recibo que los más pequeños tengan derecho a conocer qué mundo han recibido como herencia—, así que la sencilla idea de Meadows consistió en reducir la población de la Tierra a una «aldea» de tan solo mil habitantes, pero manteniendo proporcionalmente sus características. Con ello evitaba el uso de grandes cifras y porcentajes, que para muchas personas resultan intimidatorios y generan rechazo cognitivo. Para ello, Meadows tuvo que definir un cierto número de indicadores que, con un grado alto de confianza, representaran a la población mundial.

Desde su alumbramiento, el mundo en miniatura de Meadows ha resonado en las redes sociales mediante vídeos e infografías con el lema «Si el mundo tuviese 100 habitantes», donde se nos presentan características que comparte al menos el uno por ciento de la población mundial. Por tanto, si estamos hablando de 7000 millones de personas, solo se tienen en cuenta rasgos que afecten a, al menos, 70 millones de habitantes (una razón por la que, por ejemplo, los habitantes de Oceanía no figuran en el desglose por continentes que muestra la infografía adjunta). Desde un punto de vista pedagógico, la idea de reducir nuestro planeta a un pequeño pueblo donde conocemos

a todos sus moradores solo puede calificarse de brillante.

De 2006 a 2016

Los vídeos e infografías más recientes que he podido encontrar muestran datos de 2006, cuando nuestro planeta albergaba unos 6500 millones de almas. La infografía que presentamos aquí está realizada con datos de 2016, cuando la población mundial ascendía a 7500 millones de personas, y se han extraído del proyecto pedagógico 100 people: A world portrait. Esta iniciativa ha determinado distintas variables que representan algunas de las características más comunes de la población mundial, como el género, la edad, la geografía, la religión o la lengua materna, las cuales nos dicen cuán iguales o diferentes somos.

Antes de mirarla con detalle, les propongo que contrasten la imagen que puedan tener ustedes de la aldea con lo que nos revelan los datos. Así que les animo a que tomen primero un lápiz y un papel y se den tiempo para pensar y apuntar sus estimaciones a las siguientes preguntas:

- ¿Cuántos habitantes de la aldea cree que son hombres y cuántos mujeres?
- ¿Cuántos son niños (hasta 14 años) y cuántos ancianos (a partir de 65 años)?
- ¿Cuántos son asiáticos? ¿Y africanos?
- ¿Cuántos tienen como lengua materna el chino? ¿Hay más hablantes nativos de español que de inglés?
- ¿Es el hinduismo la religión más extendida? ¿Cuántos son cristianos y cuántos musulmanes? ¿Cuántos son ateos?
- ¿Cuántos no tienen dónde alojarse?
- ¿Cuántos no disponen fácilmente de agua potable?
- ¿Cuántos viven en una ciudad?
- ¿Cuántos no saben leer ni escribir?
- ¿Cuántos tienen un título universitario?
- ¿Cuántos disponen de acceso a Internet?
- ¿Cuántos tienen teléfono móvil?

Contraste ahora sus respuestas con la gráfica. El informe de 1990 de Meadows concluía con una reflexión que he repetido a mis alumnos en todas mis clases de estadística: si tienes comida en un frigorífico, ropa en un armario, una cama donde dormir y un techo sobre tu cabeza, eres uno de los 25 afortunados de la aldea. La mayor parte de los indicadores que empleó Meadows han mejorado en los últimos 30 años, y es posible que ahora mismo su lúgubre conclusión sea algo menos lúgubre. Aunque, tristemente, la desigualdad entre los habitantes de la aldea es uno de esos indicadores que han empeorado de manera sostenida en las tres últimas décadas.

Si comparamos los datos de 2016 con los de 2006, encontraremos que ahora en la aldea tenemos un niño más y un anciano menos, que hay un europeo menos y un africano más, y que cinco personas se han marchado a la ciudad. También que hay cuatro ateos más y tres analfabetos menos, aunque el escaso número de universitarios se mantiene. En comunicaciones, observamos un aumento de 30 a 47 y de 25 a 65 en el uso de Internet y teléfonos móviles, respectivamente. En nuestra aldea hay más acceso al agua potable: antes 13 habitantes no la tenían y ahora son 9. Tenemos algo más de sobrepeso y cuatro personas menos desnutridas, pero solo hemos conseguido un hogar más. Resulta interesante contrastar los resultados que acabamos de exponer con las proyecciones que en 2005 realizó en esta misma revista el demógrafo Joel H. Cohen en el artículo titulado «Tendencias demográficas».

Datos, preguntas y comunicación

¿Podemos cruzar estos indicadores? Existen fundamentalmente dos tipos de fuentes de datos: datos sin procesar y datos secundarios publicados. Con los primeros, un investigador se hace las preguntas, y obtiene las respuestas del análisis de los datos. En las fuentes de datos secundarias ese trabajo está hecho, aunque puede ocurrir que no se conteste a la pregunta en la que estamos interesados. Si hubiera una fuente primaria de datos sin procesar para toda la población mundial, sería posible determinar, por ejemplo, el número de mujeres africanas adultas que son cristianas y tienen un título universitario. Pero como los datos disponibles son secundarios, estamos limitados a las preguntas formuladas por quienes los han procesado.

Estimar las respuestas a tales preguntas no es una tarea sencilla. Los datos son recopilados por agencias y países diferentes mediante técnicas distintas, lo que obliga a los demógrafos a hacer proyecciones y usar modelos estadísticos. Por ejemplo, el censo de población de Estados Unidos se lleva a cabo cada diez años, ya que ese es el tiempo que se necesita para recopilar y depurar los datos. Como consecuencia, la mayor parte de los valores de población en el tiempo son interpolaciones y proyecciones.

Si la aldea de 100 habitantes evita los porcentajes, la página web Worldometer emplea otro sencillo truco pedagógico que permite evitar las gráficas. ¿Ha cambiado mucho la población mundial desde 2016, el año para el que se estimaron los indicadores que hemos estado discutiendo? ¿Cuántos habitantes pueblan la Tierra en este preciso instante? En el momento en que escribo estas líneas son las 17:57 del 30 de agosto de 2021. Según Worldometer, la población mundial ahora mismo es de 7.889.748.256 personas. Desde el 1 de enero han nacido 92.766.476 humanos; y en lo que llevamos de día, 287.285. Y en esos mismos períodos han muerto 38.945.589 y 121.903 personas, respectivamente.

Resulta fascinante ver cómo estos números cambian «en tiempo real» en la minimalista página web de Woldometer. Se trata de simples contadores, pero el conocimiento de que cada unidad representa el nacimiento o la muerte de una persona genera vértigo. La idea de este proyecto es que, al presentar los datos cambiando en tiempo real, no solo obtenemos una cifra, sino también la sensación de cómo van evolucionando en el tiempo sin necesidad de saber leer una gráfica. ¿Tienen sentido estos datos con tanta precisión? Obviamente, no. Worldometer nos muestra estimaciones basadas en estadísticas y en proyecciones de organizaciones como la División de Población de las Naciones Unidas, que es la que emplea en este caso.

Estadísticamente hablando, vivimos una época extraordinaria. Gracias a Internet, un par de clics nos permiten acceder totalmente gratis a una multitud de bases de datos. Sin embargo, no parece que su consulta sea algo cotidiano, por lo que seguimos discutiendo sobre política o sociología a partir de nuestras impresiones personales y de la información torticera de muchos medios de comunicación. Si queremos desarrollar el sentido crítico en la educación, saber acceder a estas estadísticas y entenderlas resulta fundamental. Así que déjenme acabar con algunas recomendaciones al respecto, a partir de las cuales podrán seguir explorando por su cuenta.

Les invito a que visiten la herramienta Google Public Data Explorer; es muy intuitiva y permite ver la evolución temporal de una impresionante cantidad de indicadores estadísticos. Para entender cómo funciona, vean la charla TED de su creador, el médico Hans Rosling. Y ya que están, no se pierdan la de Chris Jordan titulada «Turning powerful stats into art», donde maneja estadísticas de grandes números con cosas como vasos

SI EN LA TIERRA VIVIERAN 100 PERSONAS



GÉNERO
50 mujeres
50 hombres

EDAD
25 entre 0 y 14 años
66 entre 15 y 64 años
9 de 65 años o más

CONTINENTE
60 asiáticos
16 africanos
10 europeos
9 latinoamericanos o caribeños
5 norteamericanos

LENGUA MATERNA
12 chino
6 español
5 inglés
4 hindi
3 árabe
3 bengalí
3 portugués
2 ruso
2 japonés
60 otros

RELIGIÓN
31 cristianos
23 musulmanes
15 hindúes
7 budistas
8 de otras religiones
16 no religiosos

ALFABETIZACIÓN
86 saben leer y escribir
14 no saben leer ni escribir

UNIVERSIDAD
7 con título universitario
93 sin título universitario

INTERNET
47 con acceso a Internet
53 sin acceso a Internet

TELÉFONOS MÓVILES
65 con teléfono celular
35 sin teléfono celular

AGUA
91 con acceso a agua potable
9 sin acceso a agua potable

NUTRICIÓN
22 con sobrepeso
66 con peso adecuado
11 malnutridos
1 hambriento

POBREZA EXTREMA
11 viven con menos de 1,90 dólares al día
81 viven con más de 1,90 dólares al día

VIVIENDA
22 no tienen hogar
78 tienen un lugar donde cobijarse

URBANISMO
54 viven en zonas urbanas
46 viven en zonas rurales

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA; FUENTE: WWW.100PEOPLE.ORG

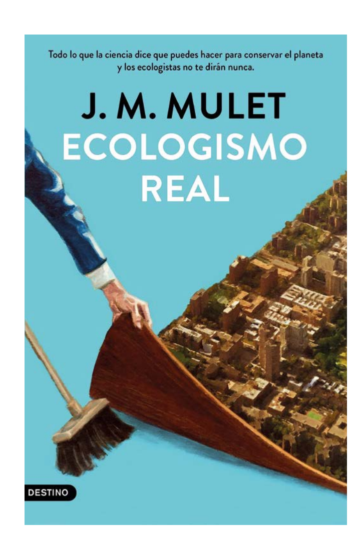
de plástico, operaciones de cirugía estética o muertes por tabaquismo, lo que nos enfrenta a la imagen de lo que realmente somos en estos momentos. Y tampoco la charla TED de Alisa Miller «How the news distorts our worldview», que usa mapas distorsionados para mostrarnos cómo ven el mundo los estadounidenses informados por sus medios de comunicación. IyC

PARA SABER MÁS

Who lives in the global village? Donella H. Meadows en *The Global Citizen*, mayo de 1990.
100 people: A world portrait. www.100people.org
Worldometer. www.worldometers.info/world-population

EN NUESTRO ARCHIVO

Tendencias demográficas. Joel E. Cohen en *IyC*, noviembre de 2005.
Vivir en un mundo superpoblado. Mara Hvistendahl en *IyC*, noviembre de 2016.
¿Es inevitable la desigualdad? Bruce M. Boghosian en *IyC*, enero de 2020.



ECOLOGISMO REAL
TODO LO QUE LA CIENCIA DICE QUE PUEDES HACER PARA CONSERVAR EL PLANETA Y LOS ECOLOGISTAS NO TE DIRÁN NUNCA
José Miguel Mulet
Destino, 2021
384 págs.

Salvar el planeta con la ciencia como herramienta

Ecología, ecologismo y todo lo que podemos hacer en el día a día para disminuir nuestra huella ambiental

Como bien indica la contraportada de este libro, el cambio climático es una realidad irrefutable cuyos efectos serán desastrosos para la humanidad si no nos tomamos el problema en serio. Junto al cambio climático, distintos daños ambientales como la proliferación de residuos, la contaminación y la pérdida de biodiversidad no solo están poniendo en jaque la vida en nuestro planeta tal y como la conocemos, sino nuestro propio estilo de vida y nuestra salud. La minimización de estos daños requiere reducir el impacto de nuestro modo de vida. Cómo conseguirlo pasa necesariamente por la acción de Gobiernos y entidades supranacionales, así como por la de las compañías que producen los bienes y servicios que consumimos. Sin embargo, como ciudadanos de a pie, tenemos también un importante papel en este proceso.

En las últimas décadas han tenido lugar grandes avances en la concienciación ambiental de la sociedad. Pese a ello, para muchas personas no es fácil saber por dónde empezar ni todo lo que puede hacerse para minimizar el impacto de nuestro modo de vida. Es aquí donde entra en escena este libro de José Miguel Mulet, catedrático de biotecnología de la Universidad Politécnica de Valencia y uno de los divulgadores científicos más conocidos de España, quien nos propone usar la ciencia para lograrlo.

El cuerpo principal de la obra se compone de seis capítulos centrados en sendos aspectos clave de nuestro día a día y que tienen un fuerte impacto ambiental (cómo nos alimentamos, movemos y vivimos, y cómo usamos los electrodomésticos, reciclamos y empleamos la energía), los cuales se completan con una introducción y dos capítulos dedicados al ecoblanqueo (*greenwashing*) y al ecologismo, que es enérgicamente criticado a lo largo de todo el libro. Sin duda, Mulet se ha planteado un reto bien ambicioso en este ensayo, ya que condensar en unas 400 páginas todo lo que puede hacerse para conservar el planeta de una manera objetiva y entendible para el público general no es nada fácil, máxime cuando la literatura científica sobre los temas tratados es colosal.

El libro presenta distintas virtudes, siendo una de las principales su sencillez y el estilo con el que está escrito. Se nota que el autor es un divulgador experimentado y capaz de usar con maestría el lenguaje, ya que la obra resulta accesible y entretenida (y en ocasiones hasta divertida, diría yo). Otros aspectos positivos son la gran variedad de temas tratados y las numerosas recomendaciones prácticas para reducir nuestra huella ambiental, las cuales no solo tienen aval científico sino que son de sentido común.

Ecologismo real incita también a reflexionar sobre cuestiones en las que abundan los prejuicios (¿es el modelo turístico de Benidorm malo para el medio ambiente?, ¿somos menos considerados con el planeta por aguantar nuestro coche unos años, o todo lo contrario?), algo que personalmente aprecio mucho en un ensayo de estas características. Y la discusión sobre las relaciones entre el ecologismo y la pseudociencia, el etiquetado ambiental y los orígenes del ecologismo político, así como las consecuencias de determinadas «políticas verdes» que acaban teniendo impactos ambientales y sociales negativos proporcionan elementos para la autocrítica, la reflexión y el debate. Todas estas ideas son sin duda interesantes y no siempre son tratadas en obras de esta naturaleza.

El libro tiene también sus defectos. Entre ellos, la brevedad o parcialidad con la que se tratan algunos de los temas más complejos y polémicos, la inclusión de cifras que no pueden contrastarse con la bibliografía proporcionada, y el uso de afirmaciones que, considerando todas las pruebas científicas disponibles, resultan difíciles de creer. A modo de ejemplo, Mulet afirma que «el ganado en cultivo extensivo (suelto) tiene más impacto ambiental (casi el doble) que el ganado en establo». ¿Podemos afirmar esto, de una forma genérica y tan rotunda, si tenemos en cuenta todos los impactos ambientales asociados a la intensificación ganadera, desde la contaminación *in situ* generada por las granjas, hasta la deforestación allende nuestros mares para cultivar la soja que importamos para producir el pienso con el que alimentamos a los animales estabulados?

Entre las cifras que no he podido contrastar se encuentra la que aparece en la afirmación «en España, por ejemplo, el 66,5 por ciento del plástico de los envases se recicla». Se trata de una cifra muy superior al 48 por ciento que arrojan los datos oficiales del Ministerio de Transición Ecológica (en 2017, las últimas disponibles). Y me ha sorprendido también que, cuando habla de residuos y reciclaje, el libro dedique mucho más espacio a criticar el sistema de depósito, devolución y retorno (apoyado por distintos grupos ecologistas, sindicatos y organizaciones de consumidores y recicladores) que a discutir las numerosas deficiencias y limitaciones de nuestro sistema actual [*véase* «El reciclaje no es como nos lo habían contado», por Fernando T. Maestre; Investigación y Ciencia, febrero de 2021]. O que en el capítulo de *greenwashing* hable más de los ecologistas que de las grandes corporaciones y de sus malas prácticas al respecto.

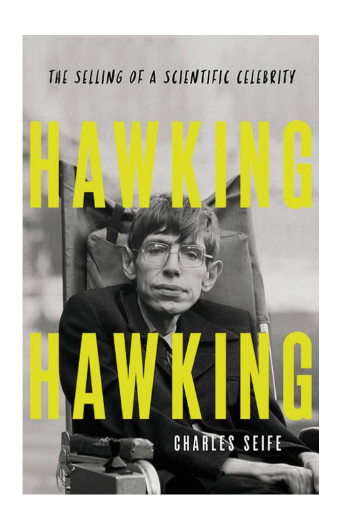
La obra deja también entrever que la preocupación por el medio ambiente es algo propio de países ricos. Pero la realidad es más compleja, como bien lo atestiguan las lamentables cifras de activistas ambientales asesinados y amenazados en países en vías de desarrollo, así como las numerosas iniciativas locales para luchar contra la deforestación, la desertificación

y el cambio climático que están surgiendo a lo largo y ancho del mundo.

Como ecólogo y persona preocupada por el impacto de nuestras acciones sobre el planeta, he leído con mucho interés *Ecologismo real*. Un libro que, además, me generó muchas expectativas al basarse en la evidencia científica como punto de partida para proponer medidas efectivas que nos ayuden a minimizar el daño sobre el entorno. Por los motivos expuestos más arriba, no las ha cumplido del todo. Aunque, como también he mencionado, la obra tiene distintas virtudes que hay que reconocer. Entiendo que no es posible tratar la gran cantidad de temas que se tocan en el libro con gran detalle. Pero la obra habría ganado muchos enteros si los temas más complejos y polémicos se hubieran discutido con mayor profundidad y de una forma más equilibrada, así como si se hubieran añadido notas al pie con las fuentes bibliográficas para poder contrastar con facilidad la información, algo básico para dotar de rigor científico a los distintos argumentos expuestos a lo largo de las páginas.

Pese a que el libro contenga aspectos y afirmaciones que no comparta, hay algo en lo que sí coincido plenamente con el autor: la ciencia es la mejor herramienta que tenemos para intentar solucionar los principales problemas ambientales. Pero pensar que la ciencia y la tecnología van a resolverlos sin que nosotros hagamos nada es un gran error. Tenemos, pues, que ponernos manos a la obra. Y, parafraseando al autor, buscar los *desired paths* que hagan que en nuestro día a día minimicemos la huella ecológica. Consejos prácticos como los proporcionados en este libro, que en muchos casos coinciden también con los propuestos por los ecologistas (el ecologismo «real» propugnado en estas páginas y el «tradicional» defendido por los grupos ecologistas tienen puntos en común), resultarán sin duda de gran ayuda para lograrlo.

—Fernando T. Maestre
Instituto Multidisciplinar para el Estudio del Medio Ramon Margalef
Universidad de Alicante



HAWKING HAWKING
THE SELLING OF A SCIENTIFIC CELEBRITY
Charles Seife
Basic Books, 2021
400 págs.

Deconstruir un icono cultural

Cómo la celebridad de Stephen Hawking acabó ocultando al científico y a la persona que había detrás

Es evidente el profundo impacto de la ciencia en la cultura popular del último siglo. Muestra de ello son, por ejemplo, el auge del género de la ciencia ficción o el mito moderno del superhéroe. A la vista de este hecho, sorprende que el número de iconos que la ciencia ha dado a la cultura popular sea tan escaso. La fama de Marie Skłodowska-Curie, Richard Feynman o Carl Sagan transcendió el ámbito académico, pero estuvo restringida en gran medida a un público con inquietudes científicas. En el siglo xx y lo que llevamos del xxi, solo encontramos dos científicos de notoriedad tan universal que sus imágenes han llegado a ser reconocibles para una gran parte de la población mundial: Albert Einstein y Stephen Hawking.

Hawking es sin duda el científico más icónico de los últimos cincuenta años. Sus opiniones sobre cualquier tema imaginable —desde la existencia de Dios a la agresividad de las civilizaciones alienígenas— generaban titulares en toda la prensa mundial. El magnetismo de su personalidad se dejaba sentir incluso entre sus colegas de profesión. Cuando, en septiembre de 2006, Hawking impartió una conferencia en el CERN, el auditorio ya estaba atestado horas antes de comenzar el evento: algo inaudito incluso en un lugar acostumbrado a acoger a figuras científicas de primer orden.

En *Hawking Hawking: The selling of a scientific celebrity*, el periodista científico y divulgador Charles Seife ha abordado la biografía de Stephen Hawking precisamente desde la perspectiva de su celebridad pública. La tarea es delicada, pues si algo diferencia los casos de Einstein y Hawking es que, mientras que en el primero persona y personaje mantuvieron una relativa cercanía, en el segundo el icono acabó ocultando en gran medida al ser humano tras él. Esto no solo constituye una de las tesis principales del libro, sino que es el elemento que condiciona su propia estructura narrativa.

Los biógrafos de Hawking coinciden en la circunstancia determinante a la luz de la cual hay que interpretar la práctica totalidad de su trayectoria vital: la esclerosis lateral amiotrófica (ELA) que comenzó a manifestársele en su último año como estudiante en la Universidad de Oxford. La perspectiva de un desenlace fatal a corto plazo, que luego se convertiría en décadas de terrible deterioro físico progresivo, está detrás de sus explosiones de creatividad y del inquebrantable optimismo vital que le acompañaría de por vida. También de la decisión de escribir *Breve historia del tiempo*, obra divulgativa que marcó el inicio de su transformación en celebridad global.

La creación del icono Hawking trajo consigo la seguridad económica con la que hacer frente a los ingentes gastos derivados de la atención continua que el científico requería. Pero, como nos explica Seife, en el éxito de la empresa resultó clave la habilidad del propio Hawking para atraer el foco de atención sobre sí, algo manifiesto ya en sus años de estudiante de doctorado. Al final, el icono acabó por adquirir vida propia: la presencia de su nombre, su imagen o su inconfundible voz generada por ordenador se convirtió en un reclamo que no implicaba necesariamente la intervención activa de Hawking en libros o series de televisión. La comercialización de la «marca Hawking» constituye una cuestión central de esta nueva biografía y está presente en el mismo título, que juega

con el apellido del físico y con el verbo inglés *hawk*, traducible por «anunciar» o «vocear una mercancía».

A la vista de todo esto, Seife argumenta que el Stephen Hawking público es una complicada construcción mediática y simbólica que es necesario atravesar para acceder al «Hawking humano». Por ello ha tomado la curiosa decisión de escribir una biografía invertida: comenzando con el entierro de sus cenizas en la Abadía de Westminster (no lejos de la tumba de Isaac Newton), el libro va retrocediendo en el tiempo, retirando una a una las capas en torno a la personalidad real del biografiado para deconstruirlo en un sentido literal.

Este original recurso literario resulta a la vez el aspecto más problemático del libro. La razón es que *Hawking Hawking* no es solo una historia de la fama de Stephen Hawking, sino también una biografía intelectual. Si toda vida se construye progresivamente sobre el propio pasado, más aún la de un científico, por la propia naturaleza de su actividad.

En el caso concreto de Hawking, hay cuestiones, como el problema de la información en los agujeros negros o las condiciones de frontera en el origen del universo, que impregnan de una forma u otra buena parte de su trayectoria científica. Por ello, para mantener el carácter inverso de la narración, Seife necesita recurrir a frecuentes analepsis con los que poner en antecedentes al lector, cuando no a apelar a su paciencia con la promesa de clarificaciones en capítulos posteriores. Como consecuencia, el relato se torna en algunos momentos alambicado e incluso repetitivo.

En cualquier caso, estos problemas estilísticos no impiden que la presente obra sea una contribución muy significativa a la ya amplia bibliografía sobre Stephen Hawking. Frente a biografías como la de Kitty Ferguson (*Stephen Hawking: A life well lived*; Black Swan, 2019), Seife huye de cualquier postura hagiográfica y refleja las múltiples facetas de la personalidad del protagonista, analizando en detalle también aquellas que puedan resultar menos halagadoras. Su análisis, aunque profundo y riguroso, se expresa en un estilo sencillo y accesible a un público amplio, lo que lo diferencia de estudios académicos como el de Hélène Mialet en *Hawking incorporated* (The University of Chicago Press, 2012).

Entre los objetivos de la obra está también el de demarcar claramente el personaje que los medios calificaban como «el sucesor de Einstein» o «la mente más brillante del mundo» del físico teórico tal y como era valorado por sus pares. Aquí Seife hace uso de sus dotes de divulgador para presentarnos las ideas científicas de Hawking en el contexto en el que surgieron y analizar en detalle su recepción. La conclusión a la que llega es que, aunque Hawking fue indudablemente un líder en campos como la cosmología o la física de los agujeros negros, su posición real en la comunidad científica no se correspondía ni mucho menos con las hipérboles mediáticas de las que —el autor nos muestra— Hawking se distanciaba públicamente a la vez que las cultivaba.

Uno de los principales obstáculos que Seife ha encontrado a la hora de escribir esta biografía ha sido la imposibilidad de recabar información de los miembros de la familia Hawking y de consultar los archivos personales del científico. El acceso a estas fuentes ha sido concedido en exclusiva a Graham Farmelo, encargado de elaborar una «biografía autorizada» cuya publicación se espera para 2024. A pesar de estas importantes cortapisas, Seife ha sabido reconstruir magistralmente a la persona tras el icono mediante numerosas entrevistas a colegas de profesión de Hawking, incluidos colaboradores y antiguos estudiantes de doctorado. Gracias a los testimonios de quienes le conocieron a un nivel más personal, obtenemos una imagen fidedigna de su vida y su quehacer científico cotidianos, a la vez que vemos emerger con nitidez la figura humana —a veces, «demasiado humana»— de Stephen Hawking. Esto convierte a *Hawking Hawking* en un magnífico ejemplo del mejor periodismo científico de investigación.

No sabemos si la anunciada «biografía autorizada» de Farmelo será también la definitiva. Sea como fuere, *Hawking Hawking* representa una importante aportación al conocimiento de la figura de este científico en sus varias dimensiones y en toda su complejidad. Seife ha aunado investigación, análisis y divulgación en un brillante estudio crítico que ejercerá una importante influencia en biografías posteriores, además de deleitar a un amplio espectro de lectores interesados en la vida y obra de una de las grandes personalidades científicas de nuestro tiempo.

—Miguel Á. Vázquez-Mozo
Departamento de Física Fundamental
Universidad de Salamanca

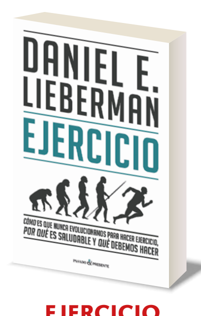
NOVEDADES

Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



¿SE TIRAN PEDOS LAS MARIPOSAS?
CÓMO PONER EN APRIETOS A UN GUÍA EN EL MUSEO NACIONAL DE CIENCIAS NATURALES

Fernando Arnáiz
Prólogo de Santiago Merino Rodríguez
Next Door Publishers, 2021
ISBN: 978-84-123555-0-5
300 págs. (20 €)



EJERCICIO
CÓMO ES QUE NUNCA EVOLUCIONAMOS PARA HACER EJERCICIO, POR QUÉ ES SALUDABLE Y QUÉ DEBEMOS HACER

Daniel E. Lieberman
Pasado & Presente, 2021
ISBN: 9788412288827
555 págs. (31 €)



LAS LUCES MÁS DIMINUTAS DEL UNIVERSO
UNA HISTORIA DE AMOR, DOLOR Y EXOPLANETAS

Sara Seager
Paidós, 2021
ISBN: 978-84-493-3828-1
360 págs. (20 €)

Recopilación de Mark Fischetti

OCTUBRE

1971

Rumbo a Júpiter

«Se están preparando dos astronaves de 254 kilogramos para el vuelo más largo hasta hoy intentado: una misión a Júpiter. La Pioneer F y la Pioneer G estarán ambas equipadas con 11 instrumentos. El viaje durará entre 19 y 32 meses y cubrirá entre 600 millones y 900 millones de kilómetros. Cada ingenio permanecerá unos cuatro días en la proximidad del mayor planeta del sistema solar. A la Tierra se transmitirá información digital a la velocidad de 1024 bits por segundo, la cual será captada por tres antenas parabólicas de 64 metros de diámetro: una en California, otra en Australia y otra en España (en Robledo de Chavela, Madrid). La energía la suministrarán generadores termoeléctricos de plutonio que producirán 40 vatios al iniciarse la misión.»

Las naves, más conocidas como Pioneer 10 y Pioneer 11, estuvieron operativas mucho más tiempo del previsto. La Pioneer 10 estuvo enviando señales hasta 2003. Hoy ambas se hallan a miles de millones de kilómetros de la Tierra, más allá de nuestro sistema solar.

TV por cable

«A comienzos de 1971 había 2500 redes de televisión por cable que servían a 5,5 millones de abonados en EE.UU. Al principio era un sistema sencillo para llevar una señal televisiva de calidad a los hogares que no la recibían, o la recibían defectuosa, y que se conocía como "televisión por antena comunitaria" (CATV). Ahora el cable puede servir a un abonado canales en número muy superior al de programas disponibles para llenarlos. Todas las redes construidas en los últimos tres años tienen al menos doce canales. Se ha desarrollado la tecnología para transportar hasta 80 canales en blanco y negro, pero una parte creciente de la recepción es en color. Aquí la limitación reside en el receptor. Los televisores domésticos comunes no pueden recibir más de 12 canales en color sin un equipo electrónico adicional.»



1971



1921



1871

1921

¿Usan radioondas las polillas?

«¿Cómo atrae a los machos la polilla hembra? No por el olor, pues los machos viajan con el viento hasta donde está la hembra. Otra hipótesis es que los machos son atraídos por el sonido, pero una hembra de la polilla *Orgya antiqua* encerrada en una caja insonorizada sigue atrayéndolos. Hace poco se ha sugerido que las polillas se comunican por "radio", por ondas electromagnéticas de longitud de onda muy corta. Probablemente los órganos más sensibles que estos insectos poseen sean las antenas. Las de la hembra, que actúa como transmisor, difieren de las del macho, el receptor. Este hecho concuerda con el diseño de los aparatos de radio, que son inalámbricos. Otro aspecto curioso es el comportamiento del macho al acercarse al lugar donde está parada la hembra. Suele posarse de un modo un tanto inseguro, moviendo las antenas más o menos como un operador de radio mueve una antena direccional para descubrir el cuadrante desde el que llegan las señales.»

Hoy la investigación indica que las polillas macho huelen las feromonas que segregan las hembras.



1971: Roca lunar de la misión Apolo 12. Este cristal [ampliado] de piroxeno mide dos tercios de milímetro de arriba abajo. Las zonas rosas y púrpuras son augita rica en calcio. Las zonas verdes son hedenbergita, rica en hierro.

1871

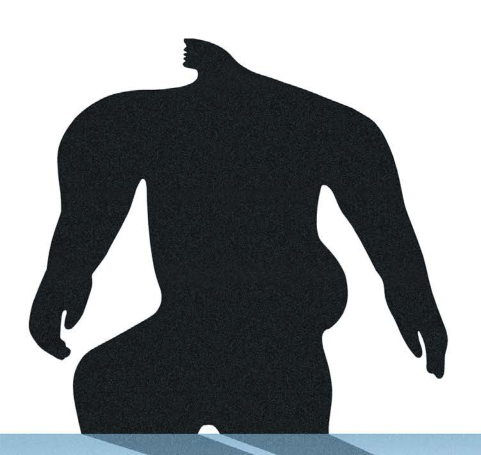
Los males del tabaco

«Mucho hay que decir en pro y en contra del tabaco. Un "mascador" empedernido consume unos ciento diez gramos por semana. Estos son unos ocho kilogramos al año de "sustancia" mezclada con arenas, tallos, melaza impura, aceite de oliva, astillas y residuos y desechos de toda clase. Un orador en la Sociedad Odontológica Estatal afirmó que los efectos destructivos del tabaco sobre los dientes son a la vez mecánicos y químicos. Dados de alta de los hospitales de San Guy y San Bartolomé nos relatan que, en todos los casos de cáncer de boca, el paciente era fumador de pipa. Nerviosismo, inapetencia, pesadillas, vértigo, indigestión, tisis, esterilidad y otras enfermedades que afectan al sistema nervioso pueden rastrearse hasta el tabaco.»

Retratista fúnebre

«Los restos del patriota, poeta y erudito italiano Ugo Foscolo fueron exhumados en el cementerio parroquial de Chiswick (Inglaterra), 44 años después de su enterramiento. El cuerpo estaba intacto y los rasgos seguían perfectos. El bigote se conservaba. La piel, ahora grisácea, se conservaba tersa, los poros y pliegues también inalterados. Con vistas a pintar un cuadro histórico, el señor Caldesi tomó una fotografía del cuerpo tal como yacía en su ataúd, el cual volvió a cerrarse y sellarse oficialmente.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. 225, N.º 4, OCTUBRE DE 1971





CONSERVACIÓN

Pumas en peligro

Craig Pittman

La endogamia del león americano es tan extrema que ha comenzado a causar daños genéticos. Un ambicioso plan pretende salvar a la especie.

INFORME ESPECIAL

ENFERMEDADES AUTOINMUNITARIAS

Traición interna

Maria Konnikova

Las enfermedades autoinmunitarias, en números

Maddie Bender, Jen Christiansen y Miriam Quick

Así comienza la autoinmunidad

Stephani Sutherland

Una enfermedad mayormente femenina

Melinda Wenner Moyer

Controlar el daño

Marla Broadfoot

COSMOLOGÍA

¿Falla algo en los fundamentos de la cosmología?

Jean-Philippe Uzan

Varias observaciones astrofísicas parecen irreconciliables. ¿Es incorrecta alguna de las hipótesis sobre las que se basa el modelo cosmológico estándar?

EXPLORACIÓN ESPACIAL

Regresar a Venus

Robin George Andrews

Por fin, tres nuevas misiones volverán a explorar nuestro largamente olvidado planeta gemelo.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas

EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz

DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay

DESARROLLO DIGITAL
Marta Pulido Salgado

PRODUCCIÓN
M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau

SECRETARÍA
Eva Rodríguez Veiga

SUSCRIPCIONES
Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307 3.º 2.ª
08009 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Laura Helmuth
PRESIDENT Stephen Pincock
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307 3.º 2.ª
08009 Barcelona

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Javier Grande: *Apuntes*, *Enanas marrones* y *El curioso comportamiento del kétchup*; Andrés Martínez: *Apuntes* y *El origen de la tartamudez*; Anna Ferran: *Los autoanticuerpos, implicados en la mortalidad por COVID-19*; Ernesto Lozano: *La genética ofrece pistas sobre la evolución de la homosexualidad, La superconductividad en el grafeno podría ser menos exótica de lo esperado* y *El LHC descubre una partícula exótica formada por cuatro quarks*; Pedro Pacheco: *¿Por qué juegan los animales?*; Xavier Roqué: *La transformación de la matemática en el siglo XVII*; Ana Mozo García: *Una nueva visión del alzhéimer*; José O. Hernández Sendín: *El futuro cuántico de la química* y *Armas supersónicas*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova 17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España



Los monográficos de
INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
TEMAS
3er trimestre 2021 • N.º 105 • 6,90 € • investigacionyciencia.es
FÍSICA COTIDIANA
De la mecánica clásica al principio de incertidumbre a través del día a día
Por Jean-Michel Courty, Édouard Kierlik, H. Joachim Schlichting y Norbert Treitz
Con ilustraciones de Bruno Vacaro